



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memòria

TREBALL DE FI DE GRAU

A background image of a large, ornate building with a central tower and many windows, likely a university building.

“ANÀLISI ESTADÍSTICA DE L'ÚS DE L'ENERGIA EÒLICA. PREVISIÓ DE LA SEVA EXPLOTACIÓ”

TFG presentat per optar al títol de GRAU en
ENGINYERIA DE L'ENERGIA
per **Oriol Casanovas Pratdesaba**

Barcelona, 8 de Juny de 2016

Director: Pablo Buenestado Caballero
Departament de Matemàtiques (MAT)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDEX MEMÒRIA

Índex memòria.....	3
Índex figures.....	5
Índex taules.....	7
Resum.....	9
Resumen	9
Abstract	10
Capítol 1: Introducció.....	11
1.1. Context i motivació	11
1.2. Objectius	13
Capítol 2: Descripció del marc de treball	15
2.1. Energia eòlica.....	15
2.1.1. Què és l'energia eòlica? Funcionament i beneficis.	15
2.1.2. L'energia eòlica al món, Europa i Espanya	17
2.1.3. Marc normatiu de l'energia eòlica a Espanya	20
2.2. El mercat elèctric espanyol.....	22
2.2.1. Aspectes bàsics de funcionament	22
2.2.2. Penetració de l'eòlica dins el mercat	23
2.3. Consideracions prèvies a l'estudi.....	24
2.3.1. Indicadors analitzats.....	24
2.3.2. Període temporal.....	26
2.3.3. Eines emprades	26
Capítol 3: Anàlisi de dades	27
3.1. Sèries temporals.....	27
3.1.1. Anàlisi de la tendència	28
3.1.2. Anàlisi dels moviments irregulars	31
3.2. Resultats de l'estudi	32
3.2.1. Generació eòlica i cobertura de la demanda	32
3.2.2. Influència de l'eòlica al preu de l'energia	38
3.2.3. Evolució de les emissions contaminants	44
3.2.4. Anàlisi d'un dia típic.....	47
3.3. Estudi de la variació estacional	54
3.4. Diagrames de caixes i bigotis	59

Capítol 4: Anàlisi Predictiva	63
4.1. Pronòstic Abril 2016	64
4.1.1. Generació d'energia eòlica	64
4.1.2. Demanda d'energia i la seva cobertura amb eòlica	67
4.2. Pronòstic any 2016	69
Capítol 5: Pressupost.....	71
Capítol 6: Conclusions	73
Capítol 7: Bibliografia	77
7.1. Referències bibliogràfiques.....	77
7.2. Bibliografia de Consulta	77

ÍNDEX FIGURES

Figura 1. Evolució de l'energia eòlica instal·lada al món en els últims 15 anys. Font: GWEC.	17
Figura 2. Capacitat eòlica per països a finals de 2015. Font: GWEC.....	18
Figura 3. Nova potència eòlica instal·lada a Europa l'any 2015. Font: EWEA....	19
Figura 4. Potència eòlica instal·lada a Espanya des de 1990. Font: AEE.	21
Figura 5. Funcionament bàsic del mercat diari de l'electricitat. Font: Energía y Sociedad.	22
Figura 6. Exemple de cassació del preu de l'energia al mercat diari. Font: OMIE.	24
Figura 7. Anàlisi de la tendència a través dels valors mitjos mensuals de la previsió eòlica peninsular.....	30
Figura 8. Anàlisi dels moviments irregulars pels valors horaris de la previsió eòlica peninsular.....	31
Figura 9. Generació eòlica en temps real i la seva aportació a la cobertura de la demanda total. Valors mitjos mensuals.	33
Figura 10. Relació entre la previsió de la producció eòlica i la seva generació en temps real. Valors mitjos mensuals.....	35
Figura 11. Previsió de la producció eòlica i la seva generació en temps real a setembre de 2014. Valors mitjos diaris.....	36
Figura 12. Evolució de la generació eòlica en temps real respecte als programes de generació PBF i P48 eòlics. Valors mitjos mensuals.....	37
Figura 13. Preu del PVPC respecte la cobertura eòlica de la demanda. Valors horaris.	38
Figura 14. Preu de l'energia al mercat spot en relació a la quantitat d'energia eòlica generada. Valors mitjos trimestrals.....	39
Figura 15. Evolució mensual de la cobertura eòlica de la demanda i del preu de l'energia al mercat spot.	41
Figura 16. Percentatge de generació d'energia lliure de CO ₂ respecte la cobertura eòlica de la demanda. Valors diaris.....	45
Figura 17. Evolució trimestral de la generació eòlica i l'energia generada lliure de CO ₂	46
Figura 18. Generació eòlica per un dia típic del període abril '14 – març '16....	47
Figura 19. Generació eòlica i la seva aportació a la cobertura de la demanda per un dia típic del període abril '14 – març '16.....	48
Figura 20. Cobertura de la demanda amb eòlica i preu del PVPC per un dia típic del període març '14 – abril '16.	48

Figura 21. Evolució de la generació eòlica per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern.	50
Figura 22. Corbes de demanda per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern.	51
Figura 23. Cobertura eòlica de la demanda per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern	52
Figura 24. Preu del PVPC per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern.	52
Figura 25. Sèrie temporal original i sèrie desestacionalitzada de la generació del programa P48 eòlic.	56
Figura 26. Sèrie temporal original i sèrie desestacionalitzada de la cobertura eòlica de la demanda.	57
Figura 27. Boxplots de la demanda d'energia i percentatge lliure de CO ₂ . Valors horaris al llarg del període abril '14 – març '16.	59
Figura 28. Boxplots de la generació eòlica i el preu del mercat spot de l'energia. Valors horaris pels respectius trimestres del període abril '14 – març '16	61
Figura 29. Evolució de la generació eòlica real i la pronosticada des d'abril de 2014 fins abril de 2016.....	66
Figura 30. Evolució de la demanda real i la pronosticada des d'abril de 2014 fins abril de 2016.....	67
Figura 31. Evolució de la cobertura real i la pronosticada des d'abril de 2014 fins abril de 2016.....	68

ÍNDEX TAULES

Taula 1. Indicadors analitzats.....	25
Taula 2. Període temporal que és objecte d'estudi.	26
Taula 3. Evolució mensual de la cobertura eòlica de la demanda.....	33
Taula 4. Variació trimestral de la cobertura eòlica respecte el mateix trimestre de l'any anterior.	34
Taula 5. Diferència percentual entre els programes de generació PBF i P48 respecte la generació eòlica en temps real.	37
Taula 6. Variació de la generació eòlica, preu al mercat spot i preu del PVPC respecte el seu trimestre anterior. Valors mitjos trimestrals.	40
Taula 7. Variació de la cobertura eòlica de la demanda i el preu del PVPC del primer trimestre de 2015 al primer trimestre de 2016.....	42
Taula 8. Estalvi obtingut en la tarifa del PVPC d'un consumidor mitjà en el primer trimestre de 2016 respecte el mateix període de 2015.	43
Taula 9. Valors mensuals del programa de generació P48 eòlic (esquerra). Percentatge de cada mes respecte a la mitjana anual i índex estacional de cada mes (dreta).	55
Taula 10. Valors mensuals del programa de generació P48 eòlic un cop aplicada la desestacionalització.	56
Taula 11. Variació de la cobertura eòlica dels darrers 12 mesos per la sèrie original i per la sèrie desestacionalitzada.	58
Taula 12. Estadístics descriptius dels diagrames de caixes de la figura 27.....	60
Taula 13. Valors mitjos mensuals de la generació d'energia eòlica en temps real.	64
Taula 14. Error relatiu obtingut entre el valor real i el predit per la generació eòlica mitjana d'abril de 2016.	65
Taula 15. Error relatiu obtingut entre el valor real i el predit per la demanda mitjana d'abril de 2016.	67
Taula 16. Error relatiu obtingut entre el valor real i el predit per la cobertura eòlica mitjana d'abril de 2016.	68
Taula 17. Pronòstic de generació eòlica i demanda d'energia per l'any 2016, en comparació amb els seus valors reals dels 5 anys anteriors.....	70
Taula 18. Costos de software.	71
Taula 19. Costos d'enginyeria.	71
Tabla 20. Pressupost total del projecte.....	72

RESUM

El 80% de l'energia consumida al món a l'actualitat encara prové de combustibles fòssils. Tot i els nombrosos estudis duts a terme en relació als grans avantatges que suposaria viure en un món fonamentat per les renovables, l'aposta definitiva per un canvi de model energètic s'està fent de pregar. I un dels països que menys voluntat està tenint per accelerar aquesta transició és Espanya, a pesar del gran potencial que ostenta.

Aquest projecte pretén analitzar el paper que està jugant a dia d'avui l'energia eòlica en el sistema de generació peninsular espanyol i les variacions que provoca al mercat elèctric i a la qualitat de l'aire. L'anàlisi s'enfoca des d'un punt de vista estadístic, de manera que s'exemplifica, amb dades reals, si té o no tanta importància un increment de la generació d'aquesta font d'energia renovable, tant des del punt de vista econòmic com mediambiental.

Per acabar, i amb la finalitat de donar continuïtat a l'estudi dut a terme, també es realitza un predicció a curt termini de certs indicadors analitzats.

RESUMEN

El 80% de la energía que se consume actualmente en el mundo todavía proviene de combustibles fósiles. A pesar de los numerosos estudios llevados a cabo en relación a las grandes ventajas que supondría vivir en un mundo fundamentado por las renovables, la apuesta definitiva por un cambio de modelo energético se está haciendo de rogar. Y uno de los países que menos voluntad está teniendo para acelerar esta transición es España, a pesar del gran potencial que ostenta.

Este proyecto pretende analizar el papel que está jugando a día de hoy la energía eólica en el sistema de generación peninsular español y las variaciones que provoca en el mercado eléctrico y en la calidad del aire. El análisis se enfoca desde un punto de vista estadístico, por lo que se ejemplifica, con datos reales, si tiene o no tanta importancia un incremento de la generación de esta fuente de energía renovable, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

Por último, y con el fin de dar continuidad al estudio llevado a cabo, también se realiza una predicción a corto plazo de ciertos indicadores analizados.

ABSTRACT

Nowadays, still an 80% of the energy consumed in the world comes from fossil fuels. In spite of the numerous studies conducted in relation to the great advantages that would suppose a world based on renewable energies, a definite commitment to changing the energy model is becoming hard to get. And one of the countries that are having less willingness to accelerate this transition is Spain, despite the great potential that it holds.

This project aims to analyse the role that wind energy is currently playing in the Spanish peninsular generation system, and the variation that causes in the electricity market and in air quality. The analysis is approached from a statistical point of view, so that it exemplifies, with real data, whether or not it is important to increase the generation of this renewable energy source, both in an economical and environmental way.

Finally, and in order to continue the study conducted, a short-term prediction of some of the analysed indicators is also performed.

CAPÍTOL 1:

INTRODUCCIÓ

Aquest primer capítol del projecte posa de manifest la intenció que es pretén aconseguir amb la realització del projecte. En aquest sentit, a banda de posar en context l'anàlisi, es respon també a les qüestions del perquè s'ha desenvolupat aquest estudi i la finalitat que es persegueix.

1.1. Context i motivació

El projecte s'emmarca en un període fonamental de la nostra història, en el qual els coneixements adquirits per l'ésser humà evidencien l'esgotament proper dels combustibles fòssils i la gran necessitat de canviar el model energètic actual. Un nou model amb una aposta clara per les energies renovables i per la mitigació de les emissions contaminants.

I, certament, alguns països europeus ja caminen sobre aquest procés transitori en aquesta segona dècada del segle XXI; però, per el cas que és objecte d'estudi, l'Estat espanyol, aquesta voluntat és molt més opaca. Les directrius imposades des d'Europa, en gran part, no s'estan seguint, de manera que estem en uns anys d'incertesa: les evidències científiques van per una banda, mentre que les accions polítiques per una altra.

Aquesta poca determinació pel canvi de model energètic, que hauria de conduir, al voltant del 2050, a assolir el complet abastiment mitjançant les renovables, és encara més paradoxal si es considera el gran potencial que té Espanya en la capacitat de generació d'energia renovable. I és que, sobretot pel que fa a l'energia solar i l'eòlica terrestre, els sostres de potència són molt superiors als objectius actuals de desenvolupament de les dues tecnologies.

D'altra banda, a part de seguir generant bona part de l'energia a través de fonts no renovables, des del començament de la crisi econòmica el preu de l'electricitat a Espanya ha crescut a un ritme molt més elevat que a la resta d'Europa, situant-se, a finals de 2015, entre les factures europees més cares.

Com és possible que, si disminuïa el consum (degut a la crisi), la factura seguís pujant? La resposta és senzilla: el govern espanyol, entrant a finals de 2011, va establir una sèrie de mesures que reduïen la importància del cost de l'energia mentre augmentaven el pes de la part de potència instal·lada.

És a dir, va pujar el percentatge de la part fixa en la factura de la llum i va disminuir la part variable. Aquesta voluntat era diametralment oposada a l'afavoriment de l'eficiència energètica a les llars. I és que un consumidor que volia implantar mesures d'estalvi energètic, passava a veure's poc recompensat pels seus canvis, ja que la part fixa de la factura era molt gran i, en canvi, la part variable, que depenia d'ell, passava a perdre importància.

Les grans beneficiades seguien sent les grans empreses de l'oligopoli elèctric, que, a pesar de la crisi econòmica, segueixen incrementen els seus guanys. Amb tot, en aquests darrers anys, ha existit un paper preponderant d'aquestes grans comercialitzadores en els quatre actors que intervenen en el mercat: producció, transport, distribució i comercialització. Tant la producció com la comercialització estan liberalitzats, metre els altres dos són sectors regulats.

Especialment remarcable és el cas de la distribució, que és on està la porció interessant. Aquest sector segueix depenent en exclusiva de les comercialitzadores, que condicionen tot allò que succeeix al mercat. Cada consumidor destina una part important dels seus diners (en la factura) cap a la distribució, tot i no saber quina és la quantitat exacta ni per a què es destina. Per tant, allò que el ciutadà acaba pagant és poc transparent.

Les condicions actuals que regeixen la factura de la llum tenen el seu inici a l'abril de 2014, moment en què es va aprovar la introducció d'uns preus fixos i comuns a tot l'estat espanyol si l'usuari complia unes determinades condicions de tensió i potència. Aquests preus, anomenats Preus Voluntaris al Petit Consumidor (PVPC), estarien estructurats en tres grans blocs: cost de l'energia, peatges d'accés i impostos sobre l'electricitat. El primer d'ells, el preu de l'energia, que es fixa per hores just un dia abans de que l'energia sigui produïda i consumida, passava a ser una part certament petita (38%) de la factura de la llum.

A banda d'anar amagant què pagava el consumidor, la legislatura 2011-1015 també ha estat poc favorable al desenvolupament i progrés de les energies renovables a l'Estat espanyol. Aquesta manca d'interès per fer una aposta definitiva per les tecnologies netes es va traduir en forma de Reial Decret-Llei el juliol de 2013. La retribució econòmica que fins al moment estaven rebent aquestes fonts d'energies quedava sotmesa a la voluntat del govern, alhora que es van anar incrementant progressivament les traves per a noves instal·lacions de recursos renovables.

Amb tot, a inicis de 2016, la situació que viuen les energies renovables és força complexa. L'energia neta que és més madura, està mes desenvolupada i té un paper més significatiu dins el mercat elèctric actual és l'energia eòlica. L'interès de desenvolupar aquest projecte serà, doncs, el de conèixer en profunditat com ha evolucionat l'energia eòlica en els últims temps. Concretament, des de l'entrada en vigor del PVPC, l'1 d'abril de 2014. L'elecció d'aquest període temporal també va encarada a observar el paper que juga l'energia eòlica en la determinació del preu final de l'electricitat.

Tot i així, la factura elèctrica és només allò que ens arriba a les cases. La principal voluntat és la de comprovar com s'han fet les coses durant els últims

dos anys en matèria de generació eòlica per tal d'afavorir el canvi de model energètic actual. En definitiva, com s'ha actuat per canviar Espanya energèticament i com caldria modificar els comportaments actuals de l'ús de l'eòlica per encaminar-nos cap a un model energètic més sostenible.

1.2. Objectius

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar numèricament l'evolució de la generació d'energia eòlica a Espanya els darrers dos anys, des d'abril de 2014 fins a març de 2016. Per fer-ho, caldrà exemplificar de manera gràfica i a través de paràmetres estadístics, el volum de generació eòlica al llarg d'aquest període i la seva incidència respecte altres indicadors: quina ha estat la seva aportació a la demanda, com ha afectat al preu de l'energia i les emissions de CO₂ que s'han evitat.

Més concretament, el propòsit és el de desenvolupar una anàlisi descriptiva extensa des de diferents punts de vista:

- Avaluació de les dades des d'un punt de vista genèric, identificant quins són els períodes de l'any amb més importància de l'eòlica i com varia la seva influència al preu de l'electricitat, a la cobertura de la demanda i a les emissions contaminants evitades depenent de l'estació meteorològica.
- Tractament dels diferents indicadors amb una visió al més curt termini possible (24 hores). Caldrà estudiar com evolucionen els paràmetres al llarg d'un dia típic dels diferents moments de l'any, determinant-ne els pics i les valls.
- Anàlisi de la variació estacional de les sèries temporals utilitzades, amb la finalitat de suprimir els efectes que produeixen els cicles estacionals en els respectius indicadors.
- Identificació dels punts anòmals de les sèries mitjançant la seva representació amb boxplots.

Un cop analitzades les dades amb un enfocament eminentment descriptiu, es pretén també dur a terme una anàlisi predictiva, tant pel mes que continua la sèrie de dades (abril de 2016), com pel global de l'any 2016.

Al final s'hauria de comprovar si, efectivament, en els darrers dos anys, la trajectòria de l'ús de l'energia eòlica a l'Estat espanyol ha estat *in crescendo* i si, d'aquesta manera, es pot afirmar que s'està produint una acceleració de la transició energètica a Espanya.

CAPÍTOL 2:

DESCRIPCIÓ DEL MARC

DE TREBALL

Abans de començar a tractar les dades i presentar-ne els seus resultats, és convenient emmarcar l'estudi que s'ha dut a terme tant des d'un punt de vista global com estatal. Aquest serà, doncs, el propòsit del segon capítol del projecte.

Es descriuran breument les característiques fonamentals de l'energia eòlica, posant èmfasi a l'evolució que ha tingut en els darrers anys a Espanya. Posteriorment, es detallaran els trets bàsics de funcionament del mercat elèctric espanyol amb especial atenció a la regulació que ha anat afectat a les energies renovables. I, finalment, com a punt de partida a l'anàlisi de dades, s'especificarà el motiu dels indicadors utilitzats i del període temporal que s'ha considerat.

2.1. Energia eòlica

2.1.1. Què és l'energia eòlica? Funcionament i beneficis.

L'energia eòlica, com la gran majoria de les energies aprofitables pels éssers humans, és una transformació de l'energia solar. El Sol irradia per hora una energia de 174.423.000.000.000 KWh a la Terra, els quals no arriben de manera uniforme a la superfície degut a que el Sol escalfa de forma diferent l'atmosfera. Per aquest motiu, la temperatura de l'aire també varia depenent de la zona de la terra. L'aire calent puja (fent disminuir la pressió atmosfèrica a la superfície), mentre que l'aire fred baixa per substituir-lo. Com que l'aire té massa, quan està en moviment produeix energia cinètica, és a dir, vent.

Aproximadament l'1% o el 2% de l'energia que arriba del Sol es transforma en vent, el qual és aprofitat pel nostre interès.

L'energia eòlica consisteix en convertir l'energia obtinguda gràcies al moviment de les pales d'un aerogenerador en energia elèctrica o mecànica. D'aquesta manera, cal distingir entre els aerogeneradors o turbines eòliques, que produeixen electricitat, i les aerobombes, dedicades al bombejament d'aigua. A més, els molins també utilitzen l'energia obtinguda del vent per a moldre el gra.

Juntament amb les seves diverses aplicacions, també es pot diferenciar entre els dos tipus bàsics en què trobem aquest recurs al nostre planeta:

- Eòlica terrestre (*onshore*). Es tracta de l'energia que s'obté mitjançant els aerogeneradors situats a la superfície terrestre. Aquest tipus d'aerogeneradors presenten una potència unitària més elevada i els seus costos d'instal·lació i manteniment són més reduïts. A part, la seva accessibilitat és molt més bona.
- Eòlica marina (*offshore*). El seu funcionament bàsic és el mateix però amb la diferència que els aerogeneradors estan ubicats al mar. D'aquesta manera, l'impacte visual i acústic és menor, fet que permet un major aprofitament del recurs eòlic (sense limitacions en temes d'espai). D'altra banda, gràcies a tenir un règim de vent més laminar i una velocitat més constant, la vida útil del generador és més gran.

Un cop el vent fa moure l'hèlix de l'aerogenerador, mitjançant un sistema mecànic d'engranatges, el rotor del generador també gira, de manera que es converteix l'energia mecànica rotacional en energia elèctrica. Per poder transferir aquesta energia a la xarxa elèctrica, cal sincronitzar la freqüència del sistema de l'aerogenerador amb la de la freqüència de la xarxa.

Habitualment, per tal de rendibilitzar la instal·lació, els aerogeneradors se solen agrupar en parcs eòlics.

L'eòlica és una forma de producció d'energia que, a pesar de ser ja considerada l'energia renovable més madura, segueix en constant evolució, sotmesa a la investigació i a les millores tecnològiques que es produeixen constantment. Per tant, molt possiblement en un futur no gaire llunyà es desenvolupin nous avenços que la facin encara més eficient i fiable.

Ara per ara, tot i que segueix provocant continus debats en relació a la seva competitivitat, ja presenta grans beneficis (tant des del punt de vista econòmic com ambiental) en relació a altres recursos:

- Baixa contaminació. Es tracta d'una energia neta: l'impacte sobre el medi ambient és pràcticament nul degut a que no involucra cap procés de combustió. D'aquesta manera, no es perjudica a la vegetació, la fauna, el sòl i les aigües i, a part, no contribueix a l'efecte hivernacle ni a l'acidificació.
- Recurs inesgotable, segur, autòcton i disponible en gairebé tot el planeta. Això permet la reducció de les importacions energètiques, alhora que es crea riquesa i ocupació laboral a nivell local.
- Reducció de la dependència dels combustibles fòssils, que contribueixen al canvi climàtic del planeta. A tall d'exemple, per cada KWh d'electricitat obtingut a partir d'energia eòlica enlloc de carbó, s'eviten 0'6Kg de CO₂, 1'33g de SO₂ i 1'67g de NO.

- Impacte nul en el transport d'energia. En comparació amb els combustibles fòssils, es tracta d'un recurs que no té conseqüències en el medi ambient un cop és transportada. D'aquesta manera, es redueix el tràfic terrestre i marítim (menys camions, vaixells i canonades). A part, els parcs eòlics són fàcils de desmuntar, la qual cosa facilita la reutilització del terreny.
- Baixos costos de producció i alta rendibilitat econòmica. En l'actualitat, es tracta d'una de les fonts més barates fins al punt de poder competir amb les fonts energètiques tradicionals pel que fa a la seva rendibilitat. A més, presenten un temps de construcció respecte altres recursos energètics certament baix.

Per tant, la producció d'electricitat mitjançant energia eòlica contribueix en gran mesura al desenvolupament sostenible del planeta. Tot i així, també presenta certs inconvenients que cal tenir en compte.

En primer lloc, la producció d'energia no és constant, degut a la variabilitat de la força del vent. En afegit, la densitat energètica del vent és força baixa, de manera que per poder generar elevades quantitats d'energia elèctrica cal utilitzar una gran superfície. D'altra banda, la instal·lació d'un parc eòlic representa una modificació significativa de l'espai mediambiental: impacte visual, impacte sobre les aus, impacte acústic, impacte per erosió i interferències electromagnètiques.

2.1.2. L'energia eòlica al món, Europa i Espanya

En l'actualitat, l'energia eòlica subministra prop del 4% del consum d'electricitat a tot el món, percentatge que, en principi, ha de seguir augmentant en els propers anys. De fet, l'Agència Internacional de l'Energia (IEA) preveu que per l'any 2020 aquesta energia pugui cobrir més d'un 5% de la demanda i, al 2040, al voltant del 9% (i més d'un 20% a Europa).

A finals de 2015, la potència eòlica instal·lada a nivell mundial era superior als 400.000 MW, la qual es preveu que sigui incrementada en més d'un 40% fins l'any 2019 (arribant a més de 600.000 MW instal·lats), segons les estimacions de la consultora Navigant_BTM.

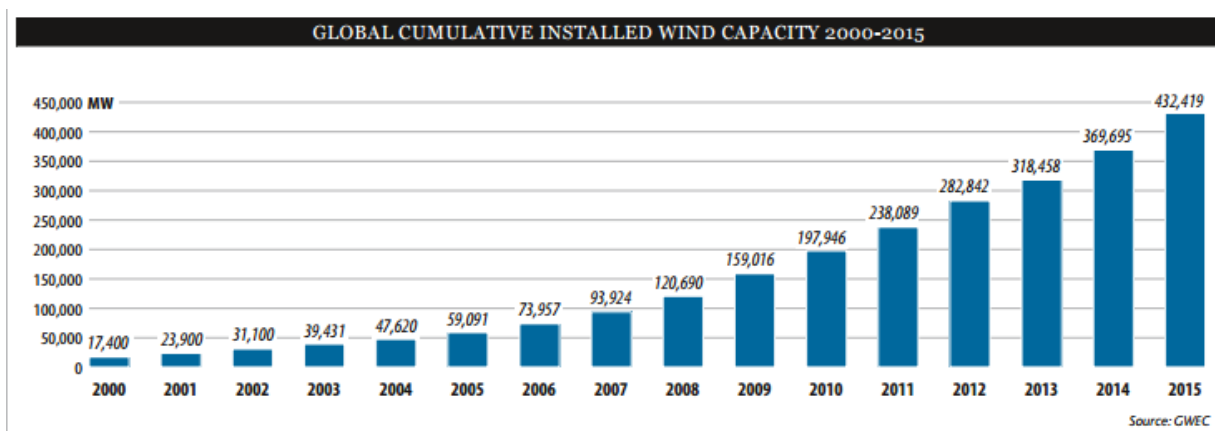


Figura 1. Evolució de l'energia eòlica instal·lada al món en els últims 15 anys. Font: GWEC.

Un dels països que des de bon començament han estat al capdavant en implantació d'energia eòlica és Espanya. Tot va començar l'any 1984, moment en què un grup d'enginyers activistes contra l'energia nuclear van fundar la cooperativa Ecotècnia i van instal·lar el primer aerogenerador a Vilopriu (Girona), de 12 m de diàmetre i 15 kW de potència.

Des de llavors, tot i els diversos entrebancs, l'evolució ha estat constant fins al punt d'esdevenir, l'any 2013, el primer país del món on l'energia eòlica fos la principal font de generació d'electricitat durant un any sencer (20'9% de la cobertura de la demanda). A més, durant aquell any, la generació d'energia gràcies al vent va ser l'equivalent al 90% del consum de les llars espanyoles, un 13'2% superior a la del 2012, essent la xifra més elevada de la història al seu moment (54.478 GWh).

Pel que fa a la potència instal·lada, en aquests últims anys la progressió s'ha frenat bastant. Tot i això, segons dades del Global Wind Energy Council (GWEC), al final del 2015, Espanya seguia sent, amb 23.025 MW instal·lats, el segon país europeu per potència eòlica després d'Alemanya (44.947 MW) i el cinquè a nivell mundial, darrere de la Xina (145.104 MW), EE.UU. (74.471 MW) i la Índia (25.088 MW).

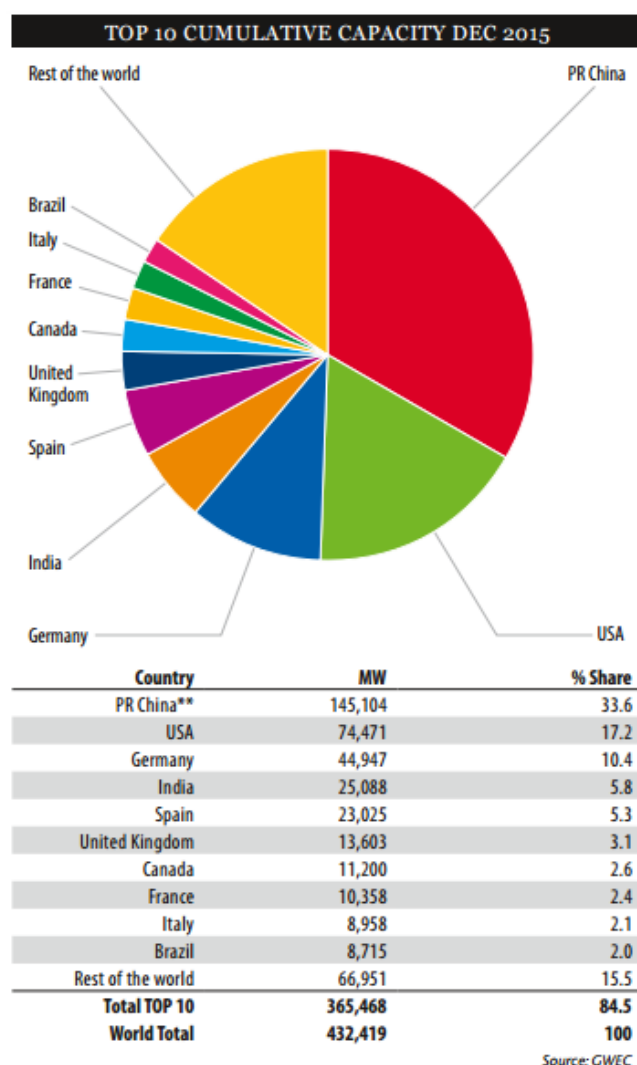


Figura 2. Capacitat eòlica per països a finals de 2015. Font: GWEC.

Si es focalitza l'anàlisi als estats de la Unió Europea, s'observa l'estancament evident d'Espanya com un dels països pioners en energia eòlica. A pesar de ser un dels territoris que més recursos té per aprofitar aquesta tecnologia, durant l'any 2015 no se'n va instal·lar ni un sol megawatt.

D'altra banda, a Europa, l'energia eòlica va esdevenir el recurs estrella amb la nova instal·lació de 12.800 MW segons dades de l'Associació Europea d'Energia Eòlica (EWEA). Alemanya, amb gairebé la meitat de la potència instal·lada l'any 2015 (6.013 MW), està liderant aquesta transició energètica al nostre continent. Darrere seu, segueixen Polònia (1.266 MW), França (1.073 MW) i el Regne Unit (975 MW). En total, la potència eòlica instal·lada a Europa ja ascendeix als 142.000 MW i pot arribar a cobrir l'11'2% de la demanda d'energia elèctrica de tot el continent.

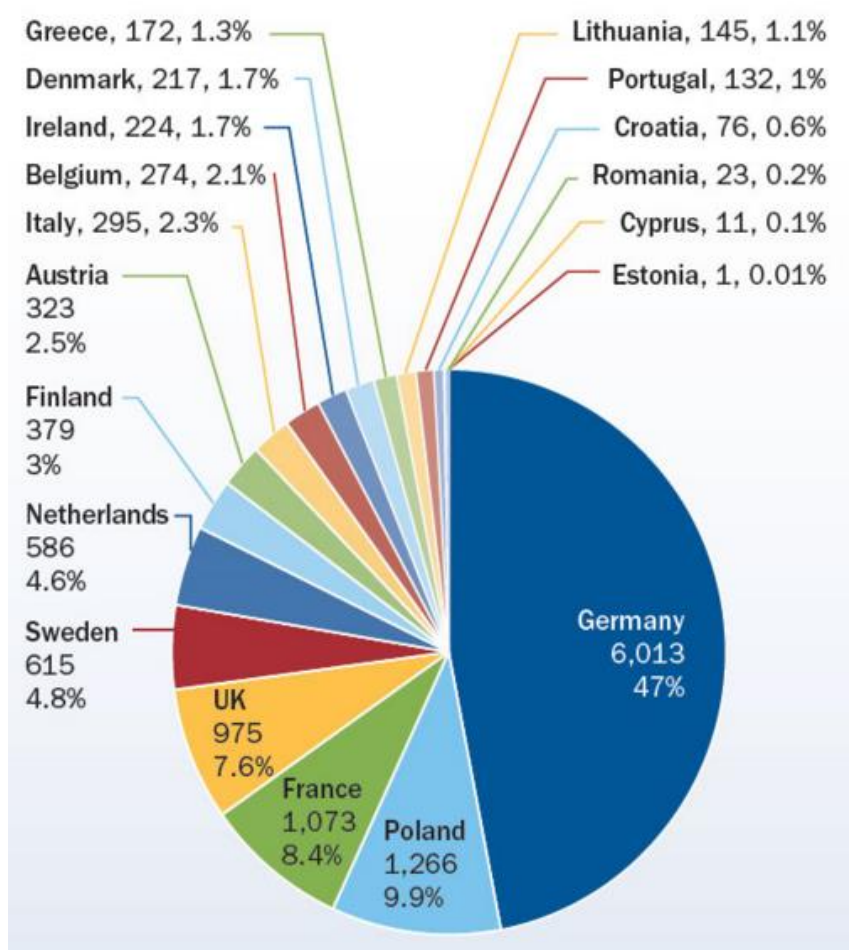


Figura 3. Nova potència eòlica instal·lada a Europa l'any 2015. Font: EWEA.

Aquest gran augment del sector eòlic europeu també s'evidencia en la inversió que s'hi ha dedicat. L'any 2015, concretament, s'hi van destinar 26.400 milions d'euros, un 40% més que al 2014. Un boom, però, del que sembla que s'està allunyant Espanya, on la regulació no està del tot clara i resulta, com es comprovarà seguidament, força ineficient.

2.1.3. Marc normatiu de l'energia eòlica a Espanya

A Espanya, el marc normatiu per comprendre els canvis que s'han produït al sector eòlic és essencial, donat que es tracta d'un sector regulat. La llei que va significar el punt de partida en la regulació eòlica va ser la Llei del Sector Elèctric de 1997, en la qual es diferenciava la producció en règim ordinari de la de règim especial i s'especificaven les retribucions econòmiques que hauria de tenir cada model de producció d'energia.

Per tant, és en aquell moment quan s'estableixen unes primes per a les fonts d'energia del règim especial (renovables, cogeneració i residus), dintre de les quals s'hi trobaria l'energia eòlica.

Al llarg dels següents anys, a part de fixar diversos objectius a través de plans de foment de les energies renovables, es va anar regulant l'activitat de producció d'energia elèctrica en règim especial, redefinint-ne el seu sistema jurídic i econòmic. Amb el Reial Decret 661/2007, es va establir un límit de potència per a cada tipus d'instal·lació del règim en especial per tal d'accedir a la retribució econòmica. Pel cas de l'eòlica, aquest límit era de 20.155 MW.

Posteriorment, amb el Reial Decret-Llei 6/2009, es van afegir condicions per accedir a la retribució econòmica: es va crear un Registre de Preassignació de Retribució, on s'havien d'inscriure obligatòriament les instal·lacions per obtenir el règim econòmic.

No obstant, la potència sol·licitada per l'eòlica (i també la termosolar) va superar el seu objectiu màxim fixat al RD 661/2007 i, per això, es va decidir anar incorporant les instal·lacions de manera progressiva d'acord amb el seu moment de la preinscripció. Pel cas de l'eòlica, aquesta incorporació al sistema es va fer en tres fases, l'última de les quals va acabar el gener de 2013.

Aquest marc normatiu va canviar força bruscament a partir de l'entrada del Partit Popular al govern espanyol a finals de 2011. A partir d'aleshores, la regulació per afavorir el desenvolupament de les renovables va quedar en segon terme i es va fixar, com a prioritat, reduir el dèficit de tarifa del sector elèctric. Per fer-ho, un dels punts importants va ser la disminució de les ajudes que rebien fins al moment aquestes tecnologies netes.

Amb el Reial Decret-Llei 1/2012 es van eliminar el conjunt d'incentius econòmics dels projectes d'instal·lació de noves plantes de producció renovable, alhora que es van suspendre indefinidament els procediments d'inscripció en el Registre de Preassignació de Retribució previstos al RD 6/2009. Tant al llarg del 2012 com també a la primera meitat de 2013, es va anar modificant la metodologia retributiva al règim especial, a més d'introduir peatges d'accessos. Però el punt culminant d'aquesta regulació poc beneficiosa per les renovables es va produir al 13 de juliol de 2013.

Aquell dia es va aprovar el Reial Decret-Llei 9/2013 amb la finalitat d'estabilitzar econòmicament el sistema elèctric. Entre d'altres mesures, es va abandonar el model d'incentiu de la Llei 54/1997. Així doncs, va desaparèixer la diferenciació entre règim especial i règim ordinari (totes les instal·lacions passaven a regir-se per la mateixa regulació).

Amb tot, la retribució econòmica per les energies renovables va quedar sotmesa a la voluntat del govern. El seu atorgament va passar a establir-se mitjançant

procediments de concurrència competitiva i el valor d'aquesta retribució passava a calcular-se mitjançant una complexa fórmula de nombroses variables.

La conseqüència més evident d'aquesta regulació és que la legislatura popular (2011-2015) ha estat la menys eòlica des del 2000: només s'han instal·lat 1.932 MW en aquests quatre anys. És més, des que va entrar en vigor el nou sistema retributiu el 2013 (que va allunyar la seguretat jurídica del país), només s'han instal·lat 27 MW, un 1,4% del total acumulat a la legislatura. Per tant, la davallada d'instal·lació eòlica en els darrers anys ha estat molt significativa.

Amb dades, la figura 4 exemplifica la important diferència entre el moment àlgid d'instal·lació eòlica (2004-2010) respecte els moments més difícils d'aquests últims anys.

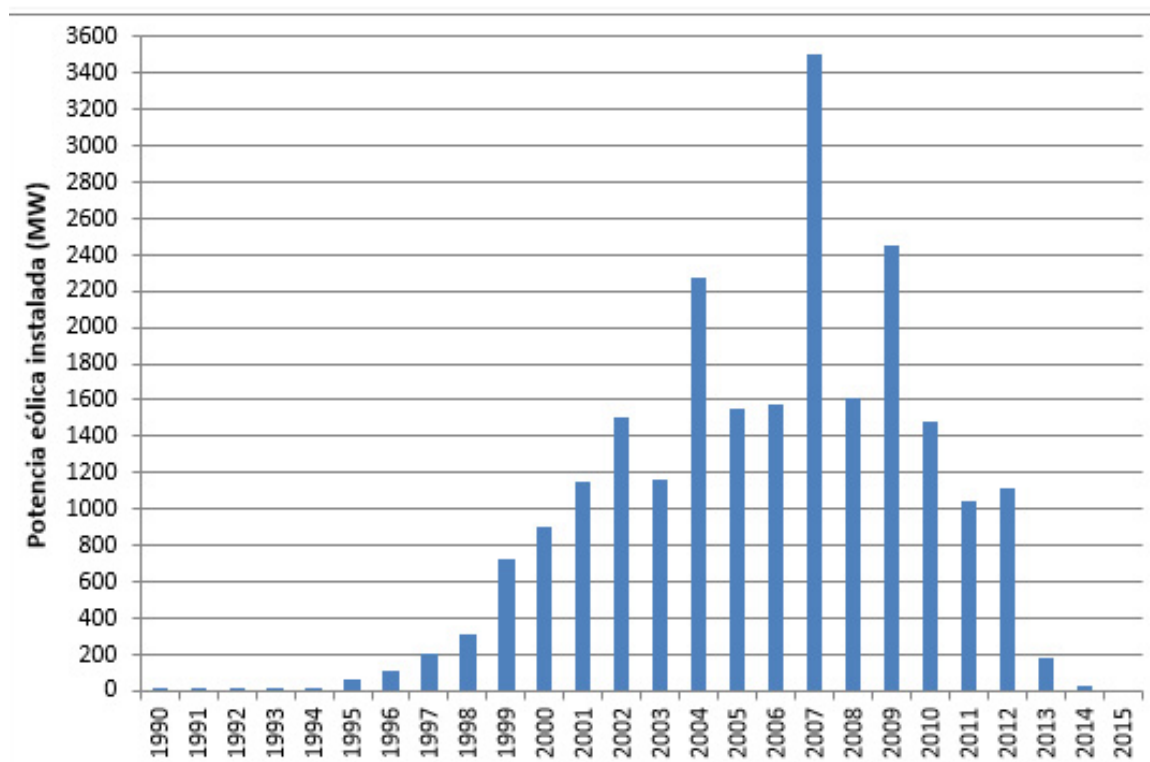


Figura 4. Potència eòlica instal·lada a Espanya des de 1990. Font: AEE.

Un altre dels efectes de la paràlisi de l'eòlica és que Espanya s'allunya dels objectius europeus de consum d'energia a través de fonts renovables el 2020, els quals són vinculants. L'única possibilitat és que es donin els passos adequats (recuperar la seguretat jurídica i llançar un calendari de subhastes, entre altres aspectes) per complir amb la Planificació Energètica a 2020 aprovada pel Govern, que xifra en 6.400 MW les necessitats de potència eòlica a assolir.

2.2. El mercat elèctric espanyol

2.2.1. Aspectes bàsics de funcionament

El mercat espanyol de l'electricitat és on es decideix un dels elements més rellevants del dia a dia de tots els ciutadans: el preu de l'energia. En aquest mercat a l'engròs (o mercat *spot*), gestionat per l'Operador del Mercat Elèctric (OMIE), els diferents agents intercanvien energia per a cadascuna de les hores del dia següent (mercat diari). Això es produeix un dia abans que l'energia sigui generada i consumida; però, tot i així, ja durant les darreres 24 hores, els agents poden modificar les seves posicions comprant o venent energia, dintre de l'anomenat mercat intradiari.

El mercat diari, on té a lloc la gran majoria d'energia bescanviada, és un mercat de tipus marginalista, en què l'oferta d'un generador representa la quantitat d'energia que està disposat a vendre a partir d'un cert preu mínim.

En primer lloc, els venedors de l'energia realitzen les seves ofertes de venda, mentre els compradors (majoritàriament, les comercialitzadores de referència) presenten les seves ofertes de compra. Això, com s'ha esmentat, es produeix per a cadascuna de les 24 hores del dia següent. L'OMIE, posteriorment, construeix les corbes d'oferta i demanda amb les propostes que s'han dut a terme. Aquestes corbes tenen forma d'esglaons, els quals fan referència a les diferents tecnologies per a produir energia (en el cas de l'oferta) i als diferents tipus de consumidors (per la demanda).

El punt d'encreuament d'aquestes dues corbes decidirà el preu final de l'energia per a les diferents hores del dia següent i s'identificaran les ofertes cassades, que són les ofertes de compra i venda que es converteixen en acords fermes d'entrega d'energia. Amb aquesta cassació final s'obté un preu definitiu, que serà el preu pagat a les respectives tecnologies per les ofertes acceptades.

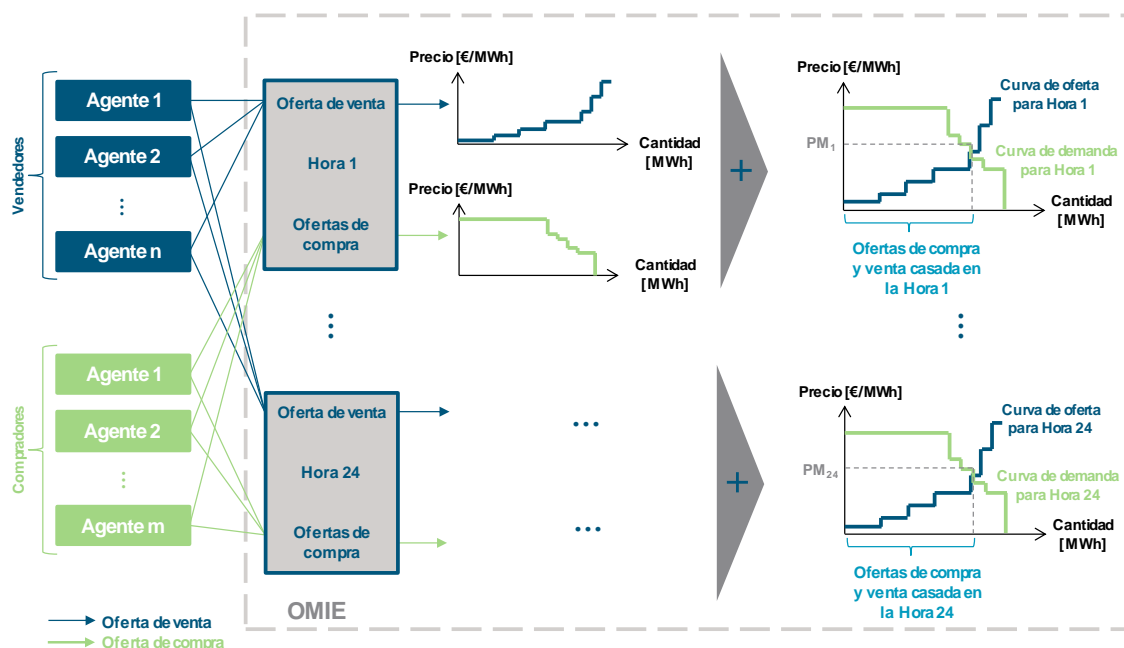


Figura 5. Funcionament bàsic del mercat diari de l'electricitat.
Font: Energía y Sociedad.

Les energies renovables, com es comprovarà en el punt següent, tenen posició de privilegi en aquest mercat de l'electricitat, ja que es troben en el primer esglaó de la corba d'oferta.

El preu de l'energia que es decideix al mercat *spot*, però, no és el mateix que aquell que arriba a les llars dels ciutadans en forma de factura elèctrica. En aquesta, hi tenen presència altres factors que encareixen el seu preu final. El consum de l'energia (38%), els peatges d'accés (41%) i els impostos (21%) constitueixen els anomenats Preus Voluntaris per al Petit Consumidor (PVPC), que són els que s'apliquen als consumidors que tenen una potència contractada inferior a 10 kW (la gran majoria). Per tant, el preu que es fixa al mercat *spot* representa menys de la meitat de la factura final de la llum.

La complexitat de funcionament d'aquest mercat de l'electricitat també es manifesta amb l'existència de diferents programes de generació d'energia, depenent del moment en què es duen a terme i dels elements que consideren. Per exemple, per cada sessió del mercat intradiari (n'hi ha 6) l'Operador del Sistema estableix una programació d'energia, anomenada Programa Horari Final (PHF). Amb diferents característiques, també existeixen el Programa diari Base de Funcionament (PBF), el Programa diari Viable Provisional (PVP) i el Programa Horari Operatiu (P48).

Els valors que presenten aquests diferents programes són força similars, donat que descriuen una mateixa hora del dia i, en aquella hora, les característiques de generació seran unes de concretes. Tot i així, com que presenten unes especificacions un pèl diferents, existeixen unes petites variacions entre ells. Aquesta certa diferència s'estudiarà al llarg del projecte, concretament a través dels programes PBF i P48.

2.2.2. Penetració de l'eòlica dins el mercat

L'energia eòlica, com a font d'energia renovable, està dotada d'un paper concret dins el mercat espanyol de l'electricitat. Tant les energies renovables com la nuclear tenen prioritat d'accés en aquest mercat, de manera que sempre presenten les seves ofertes 0 €/MWh. És a dir, constitueixen el primer esglaó de la corba d'ofertes. Això significa que si la demanda es cobrís totalment amb aquestes fonts d'energia, el preu al mercat *spot* seria nul. Un fet, val a dir, gairebé inexistent.

Aquesta alta penetració de les renovables també perjudica a altres fonts d'energia (com les centrals tèrmiques) que, tot i les seves grans inversions, tenen dificultats per vendre la seva energia i recuperar els seus alts costos inicials.

Però òbviament les seves característiques i conseqüències sobre el medi ambient són incomparables: incrementar la generació d'energia renovable no només redueix l'emissió de milions de tones de CO₂ anuals, sinó que també fa disminuir els milions d'euros dedicats a importar combustibles fòssils. Per tant, els avantatges mediambientals i econòmics són evidents.

A més, tal i com s'observa a la figura 6, on s'hi representa un exemple de determinació del preu al mercat diari, les energies renovables (i la nuclear), gràcies al fet d'entrar a zero, desplacen en gran mesura la corba d'oferta cap a la dreta. Aquest aspecte provoca que el preu que s'acaba cassant sigui considerablement més baix.

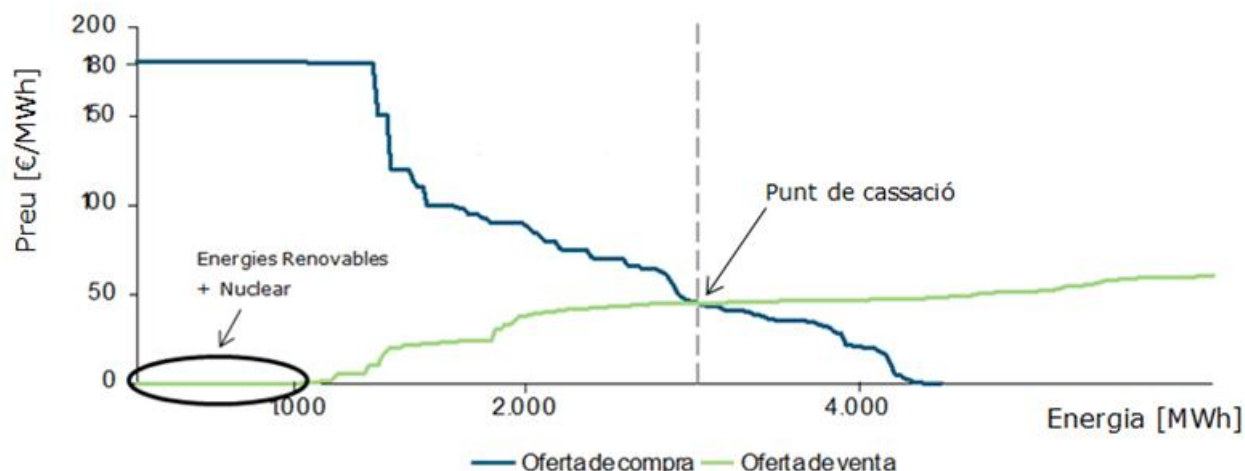


Figura 6. Exemple de cassació del preu de l'energia al mercat diari.
Font: OMIE.

A part d'observar la prioritat d'accés al mercat que tenen les renovables, també es destaca, en aquesta figura 6, que la corba de compra d'energia comença i es manté força en els 180 €/MWh. Aquest preu és el màxim permès a què es poden començar a presentar les ofertes i, generalment, les comercialitzadores de referència, com que tenen la voluntat d'assegurar el subministrament d'energia, comencen presenten la màxima oferta i així els consumidors sempre tindran l'energia que demanden.

2.3. Consideracions prèvies a l'estudi

El darrer aspecte per acabar de contextualitzar l'anàlisi és el de conèixer clarament quins són els elements que s'han enfocat. En definitiva, el conjunt de paràmetres que s'han considerat per la manipulació de les dades.

2.3.1. Indicadors analitzats

A pesar de les nombroses magnituds que inicialment s'han intentat estudiar, els indicadors amb què finalment s'ha optat per desenvolupar l'anàlisi estadística són 10. La majoria d'ells, tot i que ja s'han mencionat en l'anterior punt, es tornen a definir breument a continuació. En primer lloc, s'han considerat quatre indicadors de magnituds eòliques:

- Previsió de producció eòlica peninsular: es realitza tenint en compta la producció real d'energia eòlica i la previsió meteorològica, actualitzant-se cada hora. Va a càrrec de la consultora Aeolis.
- Generació programada PBF eòlica: s'estableix a partir dels programes d'energia resultants de la cassació de les corbes al mercat diari, a més dels programes corresponents als contractes bilaterals amb entrega física realitzats.

- Generació programada P48 eòlica: els programes horaris operatius (o P48) són el conjunt de programes que resulten després de la incorporació de totes les assignacions efectuades en ferm fins al moment de la seva publicació.
- Generació eòlica en temps real: volum d'energia que és generada mitjançant energia eòlica en territori peninsular espanyol.

Seguidament, per tal de pesar la importància que presenta l'energia eòlica dins el sistema mix de generació, s'ha introduït també la demanda total d'energia i, gràcies a aquest indicador, també s'ha calculat el percentatge de cobertura eòlica d'aquesta demanda.

Per altra banda, i ja sense tenir una consideració estrictament eòlica, s'han analitzat dos paràmetres monetaris, per així comprovar si la generació d'energia eòlica provoca o no una variació en el preu de l'energia i, conseqüentment, en la factura de la llum.

- Preu al mercat *spot*: fa referència al cost per unitat d'energia establert, per a cada hora, en el mercat diari de l'electricitat.
- Preu del PVPC: cost final de l'electricitat que arriba a la majoria de ciutadans (aquells que estan en baixa tensió i amb potència contractada inferior a 10 kW). Inclou el preu final del mercat, el finançament d'operadors i els peatges d'accés.

Finalment, també s'han incorporat a l'estudi dos indicadors que mostren la rellevància pel medi ambient que té el fet de generar energia a partir de fonts renovables. Es tracta del volum d'energia que és generada sense la presència de CO₂ i també del percentatge que aquesta energia significa del total del volum d'energia generada.

Taula 1. *Indicadors analitzats.*

Indicador	Unitat
<i>Previsió producció eòlica peninsular</i>	<i>MWh</i>
<i>Generació programada PBF eòlica</i>	<i>MWh</i>
<i>Generació programada P48 eòlica</i>	<i>MWh</i>
<i>Generació eòlica en temps real</i>	<i>MWh</i>
<i>Demanda total d'energia</i>	<i>MWh</i>
<i>Percentatge de cobertura eòlica</i>	<i>%</i>
<i>Preu de l'energia al mercat spot</i>	<i>€/MWh</i>
<i>Preu del PVPC</i>	<i>€/MWh</i>
<i>Energia lliure de CO₂</i>	<i>MWh</i>
<i>Percentatge d'energia lliure de CO₂</i>	<i>%</i>

2.3.2. *Període temporal*

L'anàlisi dels indicadors presentats en el punt anterior s'ha focalitzat en l'època més recent, de manera que les conclusions puguin ser extrapolables al dia a dia que vivim actualment. Així doncs, s'ha estudiat l'evolució de cadascun dels paràmetres en els darrers dos anys.

Per fixar la data d'inici, s'ha tingut en compte l'aprovació del govern del RD 216/2014, que tracta sobre el nou sistema per calcular el preu d'electricitat (PVPC). Aquest entra en vigor l'1 d'abril de 2014; per tant, s'ha pres aquesta data com la d'inici del nostre estudi, per tal que sigui totalment completa en les seves comparacions amb els altres indicadors.

A més, degut també a la voluntat d'analitzar cada variable per estacions meteorològiques, s'ha allargat el període fins al 31 de març de 2016, de manera que s'estudiïn dues primaveres, dos estius, dos tardors i dos hiverns. La següent taula mostra més detalladament els mesos que s'han considerat per a l'anàlisi de cada estació:

Taula 2. *Període temporal que és objecte d'estudi.*

1 d'abril de 2014 – 31 de març de 2016	
<i>Primavera</i>	<i>Abril, Maig i Juny (2014 i 2015)</i>
<i>Estiu</i>	<i>Juliol, Agost i Setembre (2014 i 2015)</i>
<i>Tardor</i>	<i>Octubre, Novembre i Desembre (2014 i 2015)</i>
<i>Hivern</i>	<i>Gener, Febrer i Març (2015 i 2016)</i>

2.3.3. *Eines emprades*

El conjunt de dades dels indicadors esmentats prèviament s'han descarregat de la pàgina web que Red Eléctrica Española posa a la disposició de qualsevol persona. Es tracta de la web pública del Sistema d'Informació d'Operador del Sistema (E-SIOS), des d'on ha estat factible la descàrrega de tots els valors de les variables per cadascuna de les hores del període establert.

E-SIOS està en permanent contacte amb els diferents operadors del mercat espanyol i també dels països veïns. Publica els resultats dels respectius mercats i programacions, alhora que emmagatzema tota la informació en la seva base de dades històrica.

El *software* amb què s'han tractat aquestes dades és l'aplicació Microsoft EXCEL, sobretot mitjançant les seves funcions estadístiques. En aquest sentit, i com es podrà comprovar en la darrera part de la presentació dels resultats, també s'ha considerat el *software* estadístic XLSTAT, amb el qual, dins del mateix full de càlcul EXCEL, s'ha treballat amb la finalitat d'obtenir el diagrama de caixes i bigotis dels respectius indicadors.

CAPÍTOL 3:

ANÀLISI DE DADES

El tractament de dades pel període establert ha permès que puguin haver-hi diferents perspectives dels indicadors. L'objectiu d'aquest capítol, per tant, és el de presentar de manera clara i entenedora els resultats obtinguts per a cadascun d'aquests enfocaments. Tot plegat, a través de representacions gràfiques, paràmetres estadístics, diagrames de caixes i bigotis i, quan convingui, definicions conceptuals.

Amb la finalitat d'exposar aquests resultats, des del cas més general fins la situació més concreta, en primer lloc s'ha analitzant el període sencer dels dos anys i, posteriorment, s'ha anat dividint l'estudi en estacions meteorològiques, en mesos, en dies i en hores.

En aquest darrer cas s'ha focalitzat l'anàlisi de manera especial, ja que s'ha estudiat com és l'evolució de l'indicador en qüestió al llarg d'un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern, duent a terme les comparacions corresponents.

D'altra banda, degut a que l'anàlisi es desenvolupa sobre sèries temporals, s'ha comprovat la presència dels components principals d'aquestes sèries en les nostres dades. Així doncs, com es podrà observar, s'entra en detall de la variació estacional i els seus efectes sobre les sèries temporals que són objecte d'estudi.

3.1. Sèries temporals

Una sèrie temporal (o sèrie cronològica) és una successió d'observacions d'una variable en determinats moments del temps. De forma habitual, aquest conjunt d'observacions es presenten en intervals regulars de temps i ordenades cronològicament. La finalitat de l'anàlisi de les sèries temporals és establir patrons de comportament que s'hagin produït en el passat i, per tant, siguin susceptibles de reproduir-se en un futur.

A pesar d'aquest objectiu global, es poden estudiar des d'un punt de vista estadístic a través de tres enfocaments: tractament clàssic de les sèries temporals, models ARIMA (o Box-Jenkins) i anàlisis espectral (amb harmònics de freqüència).

Pel cas que s'estudia, l'anàlisi serà desenvolupada des d'un punt de vista del modelat clàssic de les sèries temporals, de manera que l'enfocament és més descriptiu, podent realitzar una predicció a curt termini. Aquest tipus de tractament de dades es basa en la descomposició de la sèrie en diferents components: tendència, estacionalitat, fluctuació cíclica i moviments irregulars.

- **Tendència:** indica la direcció amb la que es mou la sèrie, reflectint l'evolució a llarg termini del fenomen observat.
- **Estacionalitat:** recull les oscil·lacions que es produeixen a curt termini (un any o menys). Es tracta d'una anàlisi deguda a la influència d'alguns fenòmens que es repeteixen periòdicament: les estacions de l'any, els dies festius, les hores punta en un dia, etc. Així doncs, es poden diferenciar dos tipus d'estacionalitat, aquella deguda a causes físico-naturals i la del punt de vista institucional.
- **Fluctuació cíclica:** tracta les oscil·lacions periòdiques a mig termini, el qual habitualment es considera superior a l'any.
- **Moviments irregulars:** és el residu de l'anàlisi tradicional d'una sèrie temporal, un cop extrets els tres components esmentats prèviament. Són deguts a esdeveniments especials i ocasionals.

Degut a que el tractament de les variacions cícliques és per sèries força més llargues (que no pas només de dos anys), aquest component no serà considerat. D'aquesta manera, mitjançant algunes dades experimentals de les diferents variables analitzades, cal comprovar quin dels altres tres elements està present en les nostres sèries temporals. Per fer-ho, es començarà estudiant tant la tendència com les irregularitats i, posteriorment, al punt 3.3 de l'informe, s'entrarà molt més en detall en l'anàlisi de les variacions estacionals, que és el factor més influenciador pel nostre cas.

3.1.1. Anàlisi de la tendència

La tendència és el component més rellevant de la sèrie temporal, ja que permet representar l'evolució de la sèrie durant un període de temps extens. Per tal de poder analitzar la tendència (detectant-la o eliminant-la) s'empren funcions matemàtiques que, aplicades als valors de la sèrie, produeixen una altra sèrie amb diferents característiques.

Amb aquests filtres que s'apliquen a les dades, es determina la tendència de la sèrie i això es pot fer mitjançant el mètode de les semimitjanes, el dels mínims quadrats o bé el de les mitjanes mòbils. En el nostre cas, s'ha emprat el càlcul de la tendència pel mètode dels mínims quadrats, que és el més utilitzat per ajustar tendències.

Coneixent l'equació lineal que relaciona dues magnituds x i y :

$$y = ax + b \quad (1)$$

On:

- a = pendent de la recta
- b = ordenada a l'origen

Aquest mètode consisteix en analitzar l'evolució de la variable dependent y en funció dels valors de la variable independent x , de manera que s'acaba disposant d'un conjunt de punts (x_i, y_i) que es poden representar gràficament. El mètode dels mínims quadrats, doncs, determina els paràmetres **a** i **b** que s'ajusten millor al conjunt de punts obtinguts, mitjançant les següents expressions:

$$a = \frac{n \cdot (\sum x_i y_i) - (\sum x_i) \cdot (\sum y_i)}{n \cdot (\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - a \cdot (\sum x_i)}{n} \quad (3)$$

On:

- n = número de mesures

A part de representar l'equació de la recta per la nostra sèrie temporal, EXCEL també permet mostrar la qualitat del model representat mitjançant l'estadístic R^2 (coeficient de determinació), el qual pren valors entre 0 i 1, de manera que com més s'aproxima a 1 més elevada és la bondat de l'ajustament. És a dir, si presenta un valor de 0,8 significa que les dades són explicades en un 80% pel model matemàtic.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

On:

- \hat{y}_i és el valor estimat de y_i .
- \bar{y} és el valor mitjà de y .

Aquest valor, com s'observarà al llarg del projecte, també es pot obtenir elevat al quadrat el coeficient de correlació r , a partir de la següent expressió:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (5)$$

On:

- S_{xy} és la covariància de la sèrie de dades x, y .
- S_x i S_y són les desviacions estàndard de les dues variables.

A continuació, es presenta una mostra de la tendència per a una de les sèries temporals que s'han tractat, per així exemplificar si el model es pot ajustar de manera lineal. Concretament, es tracta de l'evolució de la previsió eòlica peninsular al llarg dels dos anys, considerant els valors mitjans de cada mes.

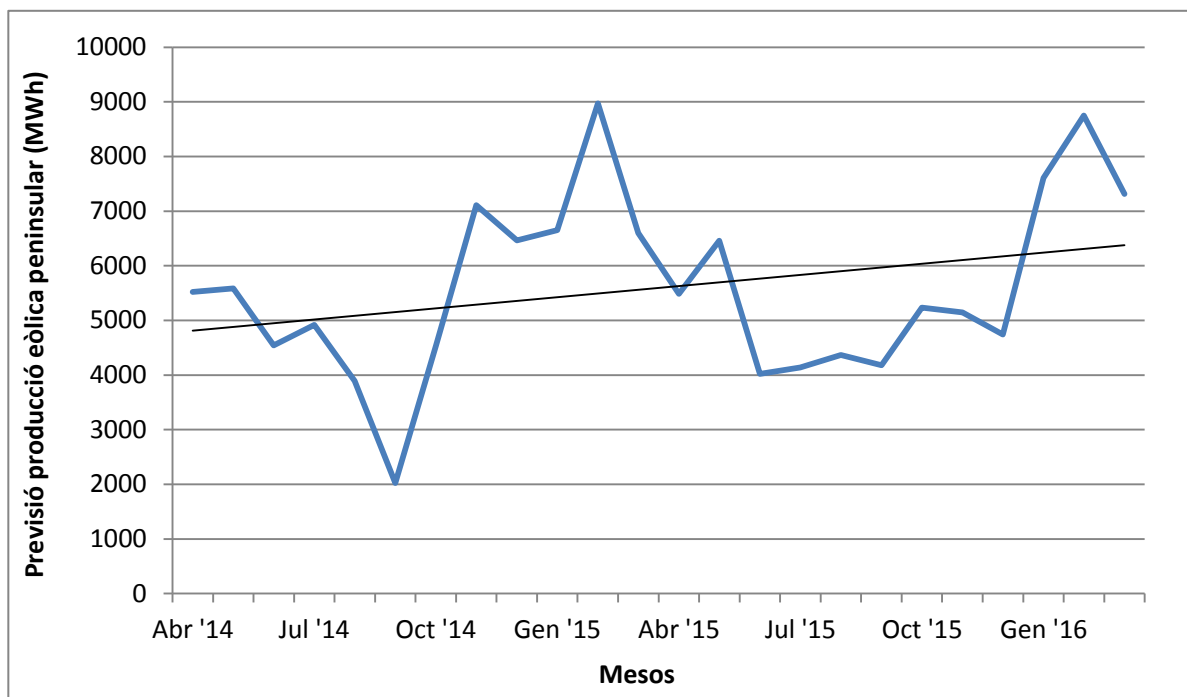


Figura 7. Anàlisi de la tendència a través dels valors mitjans mensuals de la previsió eòlica peninsular.

On:

- Equació de la línia de tendència: $y = 68,109x + 4742,6$
- Coeficient de determinació: $R^2 = 0,0863$

Com es pot comprovar, degut a que es tracta d'una sèrie temporal que depèn molt clarament de les estacions meteorològiques, no existeix cap mena de tendència. En aquest sentit, el coeficient R^2 presenta un valor molt pròxim a zero, de manera que es pot afirmar que l'ajustament de la línia de tendència al model és molt pobre.

Tot i que s'ha pres la previsió de producció eòlica peninsular com a tall d'exemple, els resultats obtinguts es poden extrapolar per als altres indicadors que s'han estudiat, ja que tots ells presenten les mateixes característiques (gran dependència de l'època de l'any). Per tant, es pot afirmar que no existeix tendència en cap de les sèries temporals tractades.

Tot i que cap variable presenti tendència al llarg del temps, la comparació entre dues d'elles, en molts casos, sí que ho fa. Així doncs, sobretot el paràmetre del coeficient de determinació caldrà tenir-lo en compte a l'hora d'observar el nivell de relació (directe o invers) entre dues variables.

3.1.2. Anàlisi dels moviments irregulars

Els moviments irregulars (o variació aleatòria) en una sèrie temporal representen el conjunt de factors ocasionals que generalment són imprevisibles. Així doncs, aquests moviments ocasionals no presenten cap regularitat.

Es tractaria, per tant, de les anomalies d'una sèrie temporal. Per observar-les, s'ha utilitzat el mateix indicador d'exemple que en el cas anterior; en aquesta ocasió, no obstant, s'han pres els valors de cada hora al llarg dels dos anys.

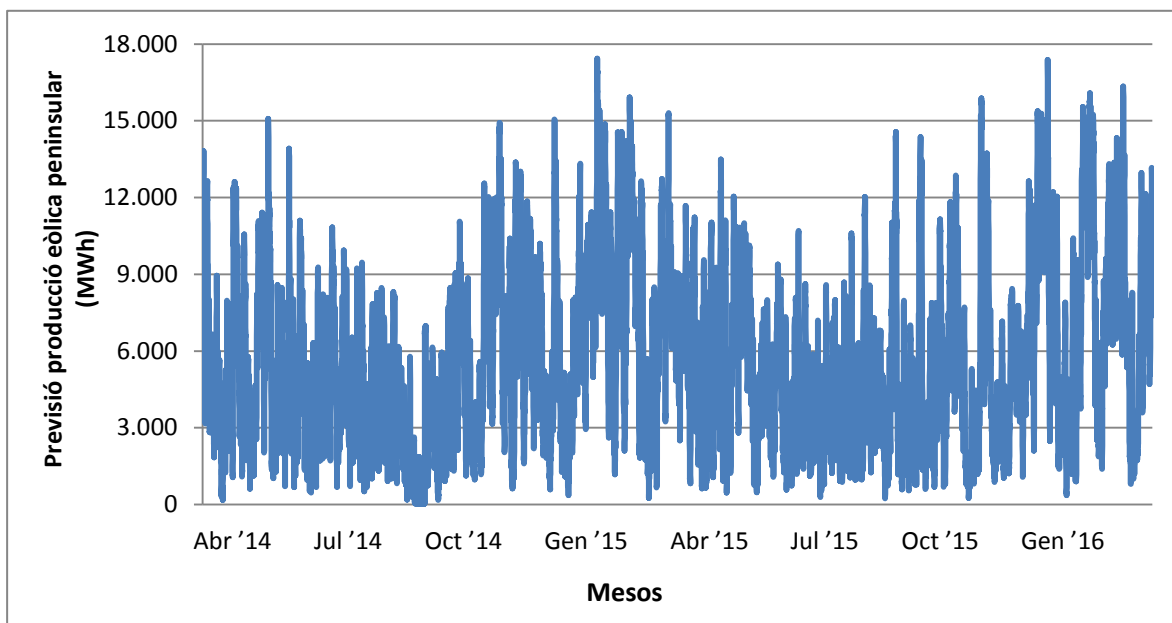


Figura 8. Anàlisi dels moviments irregulars pels valors horaris de la previsió eòlica peninsular.

La representació de la previsió de producció eòlica per hores (un total de 17.544 valors) mostra uns resultats força diferents als de l'estudi realitzat prenent els valors mitjos mensuals. De fet, tal i com s'observa, els moviments irregulars estant bastant presents en aquesta sèrie temporal.

Si, pel cas anterior, cap valor mig mensual superava els 9.000 MWh de previsió eòlica, en aquesta anàlisi es pot comprovar com en moltes ocasions no només se supera aquesta xifra, sinó que, en algunes hores, ho fa en escreix (més de 15.000 MWh). D'altra banda, també es pot veure com en diversos moments la previsió eòlica presenta valors mínims arribant, fins i tot, als 0 MWh en algunes hores d'estiu.

Per tant, es verifica com existeixen variacions aleatòries a la sèrie temporal: jornades d'extraordinària previsió de vent i, en canvi, també força dies on la producció eòlica pràcticament s'ha desestimat al sistema energètic peninsular. Això sí, tal i com s'ha anat veient, el valor de cada dada ve determinat molt directament pel moment de l'any en què es pren.

Així doncs, cal estudiar amb deteniment la influència que té l'estacionalitat en la nostre sèrie i, d'aquesta manera, poder conèixer quina és la veritable posició de cada valor horari sense la influència de les estacions meteorològiques. Aquest procés de desestacionalització s'ha aplicat *a posteriori* de l'obtenció de resultats de les diferents anàlisis.

3.2. Resultats de l'estudi

El cos principal del projecte es desenvolupa en aquest punt del treball, on s'hi exposen tant les conclusions a què s'ha arribat després del tractament de dades, com les representacions gràfiques i paràmetres que ho exemplifiquen. Es duu a terme a través de dos estudis diferents: per una banda, l'anàlisi del període temporal sencer i, per l'altra, la manipulació de dades per tal d'obtenir el dia típic de cada estació meteorològica.

Dintre del primer estudi, s'han dut a terme diverses anàlisis comparatives entre els indicadors presentats al punt 2.3.1:

- Anàlisi de la generació eòlica i la seva aportació a la cobertura de la demanda. A més, comparació entre els diferents programes de generació eòlica considerats.
- Anàlisi de la influència que té la generació d'energia eòlica en la variabilitat del preu de l'energia, tant en el mercat *spot* com en el preu final del PVPC.
- Anàlisi de l'evolució de les emissions de CO₂ en funció de la generació eòlica.

Tot plegat, posant el focus des de diferents punts de vista per tal d'obtenir conclusions significatives. Primerament, s'exposarà l'evolució dels resultats al llarg dels dos anys a través de valors mitjos mensuals i trimestrals i, posteriorment, per als casos pertinents, també s'analitzaran els indicadors mitjançant els seus valors horaris i diaris.

Pel que fa al segon estudi, l'anàlisi d'un dia típic, s'hi podrà comprovar com és l'evolució dels paràmetres estudiats al llarg de les 24 hores d'un dia mitjà. És a dir, s'agafarà el valor mig de totes les dades de les 00:00, de les 01:00, de les 02:00 i fins a les 23:00. D'aquesta manera, s'obtindrà una visió més concreta i al més curt termini possible dels diversos indicadors estudiats.

3.2.1. Generació eòlica i cobertura de la demanda

Aquest primer estudi tractarà el conjunt d'indicadors eòlics que s'han considerat en el projecte: previsió de la producció eòlica peninsular, generació del programa PBF eòlica, generació del programa P48 eòlica i generació eòlica en temps real. Serà precisament aquest últim paràmetre on s'hi farà més èmfasi, sobretot també a partir de l'anàlisi de l'aportació eòlica a la cobertura de la demanda.

Així doncs, començant per aquest darrer cas, s'observa quina és l'evolució de la generació eòlica i de la demanda al llarg del període considerat. A més, en relació a la representació gràfica, es mostra també a la taula 3 el percentatge exacte en què l'energia eòlica ha anat cobrint la demanda en aquests darrers dos anys.

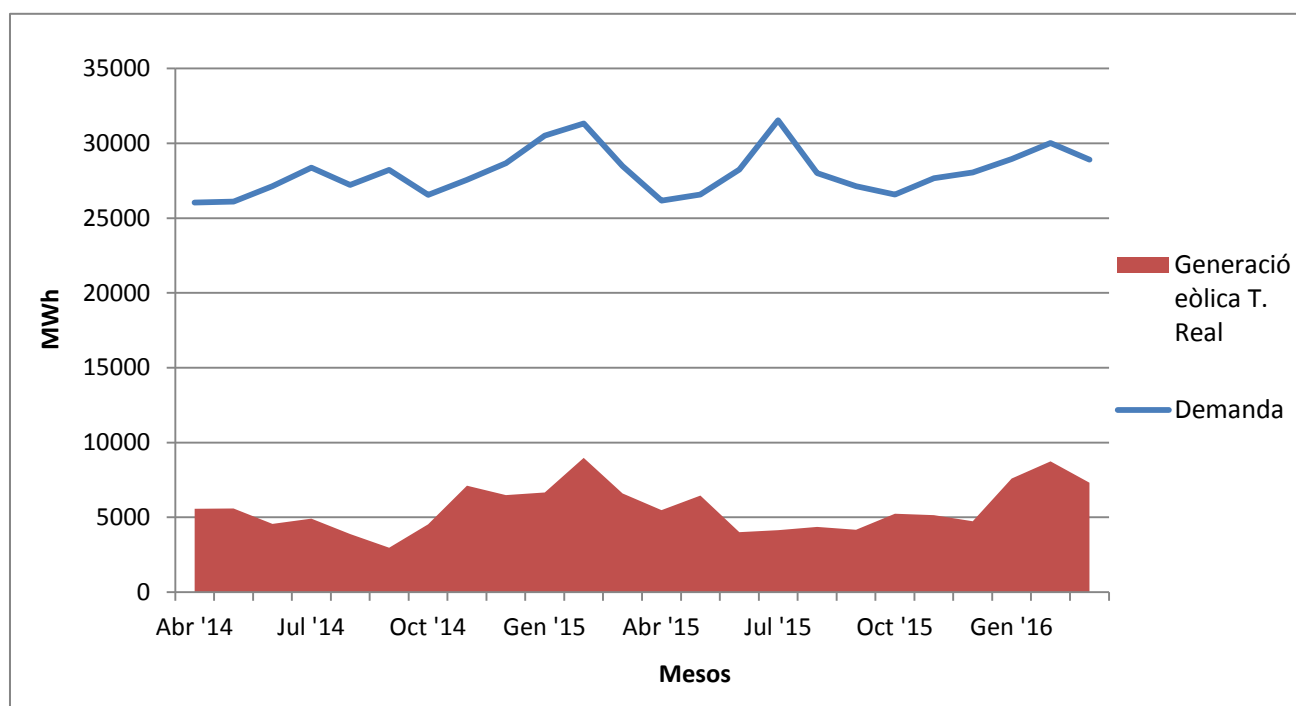


Figura 9. Generació eòlica en temps real i la seva aportació a la cobertura de la demanda total. Valors mitjos mensuals.

Taula 3. Evolució mensual de la cobertura eòlica de la demanda.

	Cobertura eòlica de la demanda (%)		Cobertura eòlica de la demanda (%)
Abril '14	21,40	Abril '15	20,96
Maig '14	21,43	Maig '15	24,29
Juny '14	16,82	Juny '15	14,21
Juliol '14	17,32	Juliol '15	13,14
Agost '14	14,27	Agost '15	15,58
Setembre '14	10,53	Setembre '15	15,37
Octubre '14	17,08	Octubre '15	19,73
Novembre '14	25,83	Novembre '15	18,60
Desembre '14	22,63	Desembre '15	16,90
Gener '15	21,83	Gener '16	27,63
Febrer '15	28,65	Febrer '16	29,93
Març '15	23,17	Març '16	25,88

Les dades analitzades donen bona mostra de l'evolució periòdica que ha tingut l'eòlica dins el sistema de generació d'energia. Aquesta regularitat es pot comprovar en el fet que les estacions meteorològiques segueixen sent indicatiu d'alta o baixa demanda (i alta o baixa generació eòlica), independentment de l'any analitzat.

Com es pot veure, els mesos hivernals són els de més cobertura eòlica, sobrepasant el 20% en tots els mesos, mentre que, a l'estiu, mai s'arriba a aquest percentatge. Aquests fets es repeteixen durant els dos anys estudiats, com també la presència de valors força similars en els mesos de primavera i tardor tant pel 2014 com pel 2015.

Com a conclusió global, s'observa a la figura 9 que, a més demanda d'energia, més generació eòlica es produeix a Espanya, la qual cosa es repeteix a la majoria de mesos excepte als de més calor: tant al juny, juliol i agost del 2014 i 2015, els valors de demanda augmenten i són força destacats (sobretot el cas anòmal de juliol de 2015), mentre la generació eòlica presenta els valors mínims anuals en aquests mesos.

El motiu de la peculiaritat de juliol de 2015 pot recaure en el fet que fos el juliol més càlid a Espanya des que se'n tenen registres. Així doncs, mentre la demanda d'energia (sobretot de refrigeració) es disparava, el potencial de generar energia eòlica era el típic d'un mes de poc vent. Això va comportar que s'hagués de cobrir la demanda amb altres fonts d'energia, deixant la cobertura eòlica en un reduït 13,1%.

Tot i així, a partir d'aquell mes, la generació eòlica ha anat remuntant fins al punt d'assolir, al primer trimestre de 2016, uns registres molt significatius: de mitjana trimestral, la demanda ha estat coberta per energia eòlica en més d'una quarta part.

Per tal de comprovar quina és l'evolució anual d'aquestes dades de cobertura eòlica, se n'ha analitzat el percentatge de variació trimestral respecte l'any anterior.

Taula 4. Variació trimestral de la cobertura eòlica respecte el mateix trimestre de l'any anterior.

	Cobertura eòlica de la demanda (%)		Cobertura eòlica de la demanda (%)	Variació (%)
2n trimestre 2014 (Primavera '14)	20,14	2n trimestre 2015 (Primavera '15)	20,26	+0,62
3r trimestre 2014 (Estiu '14)	14,34	3r trimestre 2015 (Estiu '15)	15,03	+4,81
4t trimestre 2014 (Tardor '14)	22,35	4t trimestre 2015 (Tardor '15)	18,92	-15,37
1r trimestre 2015 (Hivern '15)	24,89	1r trimestre 2016 (Hivern '16)	27,78	+11,56
PRIMER ANY	20,41	SEGON ANY	20,48	+0,34

En aquesta anàlisi trimestral es confirma quin és el moment de l'any en què bufa més el vent i en quin ho fa menys. A més, pel que fa a la variació percentual, es comprova com s'ha superat el sotrac del darrer trimestre del 2015, en què la cobertura eòlica de la demanda no va arribar ni al 19% (en contraposició al 22,35% de l'any anterior). En aquest sentit, cal tenir en compte que les condicions climatològiques a l'octubre, novembre i desembre de 2015 van ser extremadament anòmales, ja que es van produir períodes de temperatura estiuenca, fet que, com ja s'ha comentat, provoca una disminució de la cobertura eòlica.

A l'inici d'aquest any 2016, però, les coses han anat d'una manera molt diferent, ja que l'energia eòlica ha assolit valors històrics: gairebé el 28% de la demanda ha estat coberta gràcies al vent, la qual cosa significa un increment d'un 11,56% respecte el mateix trimestre de l'any anterior.

De manera global, l'augment de la cobertura eòlica del segon any (abril 2015-març 2016) respecte el primer (abril 2014 – març 2015) queda mitigat per les males dades de la tardor del 2015, deixant la variació anual en +0,34%. Extraient aquest període fosc, es comprova que la cobertura eòlica ha augmentat en cada trimestre respecte el seu valor de l'any anterior.

Fins aquest moment, només s'han considerat els indicadors de la generació eòlica en temps real, la demanda d'energia i la seva cobertura eòlica. Però, com s'ha esmentat, també s'han utilitzat altres indicadors de producció eòlica per estudiar-ne les seves característiques i poder-ne extreure altres conclusions.

En primer lloc, s'ha analitzat si hi havia o no diferències entre la quantitat d'energia eòlica que es preveu que es produeixi i l'energia eòlica finalment generada. Juntament amb la representació gràfica que exemplifica aquestes dues evolucions, es mostra també el valor més gran de diferència mensual entre els dos paràmetres.

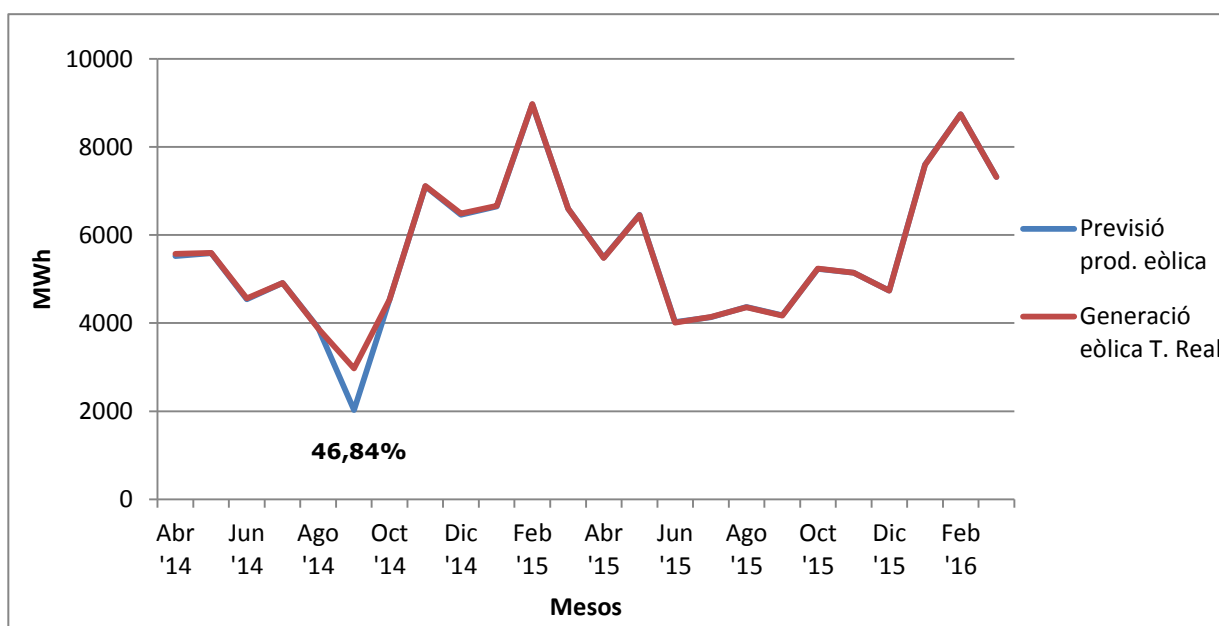


Figura 10. Relació entre la previsió de la producció eòlica i la seva generació en temps real. Valors mitjos mensuals.

Amb aquesta figura 10 es comprova com la previsió eòlica i la seva generació real presenten valors pràcticament idèntics exceptuant el setembre de 2014. Valors en mà, la diferència percentual entre aquests dos indicadors és sempre de menys de l'1% al llarg de tots els mesos, menys en el cas d'aquest mes especial, que assoleix la xifra desorbitada de 46,84%.

Focalitzant l'atenció al setembre de 2014, en primer lloc, s'observa que es tracta del mes amb menys generació eòlica de tot el període estudiat. Per tant, podria ser degut a que l'expectativa de vent encara era molt més reduïda que aquella que finalment va ser.

Per conèixer amb certesa d'on surten aquests gairebé 1.000 MWh de diferència entre la previsió eòlica i la generació real, s'han analitzat els valors diaris d'aquests dos indicadors al llarg del mes.

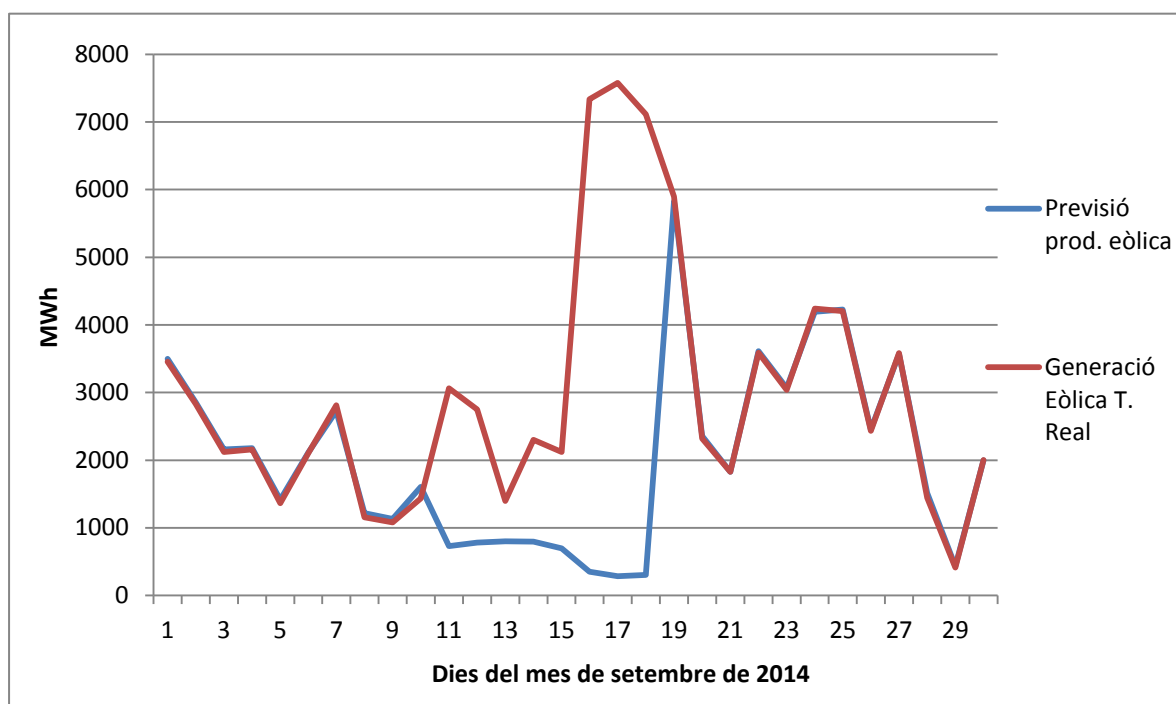


Figura 11. Previsió de la producció eòlica i la seva generació en temps real a setembre de 2014. Valors mitjans diaris.

Com es pot observar, els valors que es van predir per la producció eòlica peninsular entre els dies 11 i 18 (ambos inclosos) del mes de setembre de 2014 van ser completament erronis. Per tant, es tractaria òbviament d'un problema del sistema de predicció, que va a càrrec d'Aeolis, i no pas de la predicció de vent en si per aquells dies.

Tot i que també es veu un gran increment de la generació eòlica en temps real justament en aquell període, val a dir que es tracta d'un fet més normal. De fet, a la majoria de mesos hi ha una o fins i tot dues puntes d'extraordinària generació eòlica.

D'altra banda, amb la mateixa finalitat que aquest estudi, també s'ha analitzat la variació entre dos dels programes de generació eòlica respecte la generació eòlica en temps real. Aquests dos programes són el Programa Base de Funcionament (PBF) i el Programa Horari Operatiu (P48).

D'aquesta manera, també és d'interès conèixer quina és la diferència percentual entre els 3 indicadors per a cada mes, per tal d'esclarir si les característiques que té cada programa provoquen que els seus valors distin molt d'aquells que finalment es produeixen pel que fa a la generació eòlica real.

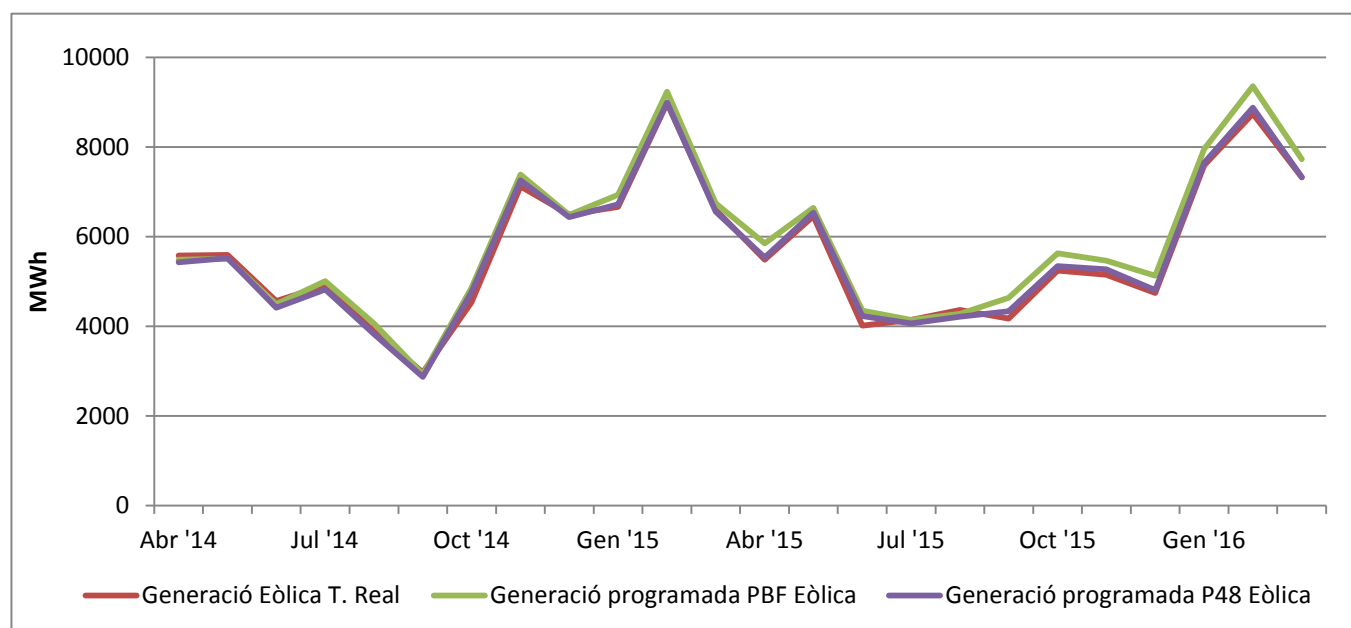


Figura 12. Evolució de la generació eòlica en temps real respecte als programes de generació PBF i P48 eòlics. Valors mitjos mensuals.

Taula 5. Diferència percentual entre els programes de generació PBF i P48 respecte la generació eòlica en temps real.

	PBF respecte Gen. Real (%)	P48 respecte Gen. Real (%)		PBF respecte Gen. Real (%)	P48 respecte Gen. Real (%)
Abr '14	-1,58	-2,61	Abr '15	+6,61	+0,95
Mai '14	-1,55	-1,38	Mai '15	+2,80	+1,18
Jun '14	-1,60	-3,29	Jun '15	+8,43	+5,46
Jul '14	+1,79	-1,99	Jul '15	-0,15	-2,03
Ago '14	+4,60	-1,53	Ago '15	-1,91	-3,42
Set '14	-1,45	-3,36	Set '15	+11,12	+3,87
Oct '14	+7,01	+4,99	Oct '15	+7,33	+1,84
Nov '14	+3,80	+1,98	Nov '15	+6,17	+2,31
Des '14	-0,03	-0,86	Des '15	+8,16	+1,37
Gen '15	+4,04	+0,84	Gen '16	+4,75	+0,67
Feb '15	+2,88	+0,14	Feb '16	+7,01	+1,57
Mar '15	+2,12	-0,60	Mar '16	+5,58	+0,11

De forma genèrica, es constata que el programa de generació P48 s'aproxima més al valor de generació real, ja que contempla els diferents serveis d'ajustaments que es produeixen al sistema (conjunt d'assignacions i modificacions de programa aplicats per l'Operador del Sistema fins la seva publicació). D'aquesta manera, presenta uns percentatges de variació respecte la generació real bastant més baixos que els del PBF. I és que el Programa Base de Funcionament té un caràcter més previ, fet que, òbviament, fa que els seus registres variïn un pèl més d'una realitat que està sotmesa a la immediatesa.

3.2.2. Influència de l'eòlica al preu de l'energia

El segon anàlisi que s'ha dut a terme dins el context de l'estudi del període temporal sencer és l'afectació de la generació d'energia eòlica al mercat diari de l'electricitat. Així doncs, els indicadors amb què s'ha treballat en aquest punt són els següents:

- Generació d'energia eòlica en temps real (MWh).
- Cobertura eòlica de la demanda (%).
- Preu de l'energia al mercat *spot* (o *pool*) de l'electricitat (€/MWh).
- Preu de la tarifa regulada PVPC (€/MWh).

Per tal d'adquirir una visió més global d'aquest estudi, es comença presentant l'anàlisi comparativa entre els dos indicadors que poden resultar de més interès: la relació entre el percentatge de demanda que és coberta per l'energia eòlica amb el cost real de l'electricitat per a la gran majoria de ciutadans espanyols (preu del PVPC).

D'aquesta manera, representant cadascuna de les hores des de l'1 d'abril de 2014 fins al 31 de març de 2016, s'obté el gràfic següent, on s'hi pot observar una clara tendència a la baixa del preu a mesura que la cobertura eòlica augmenta.

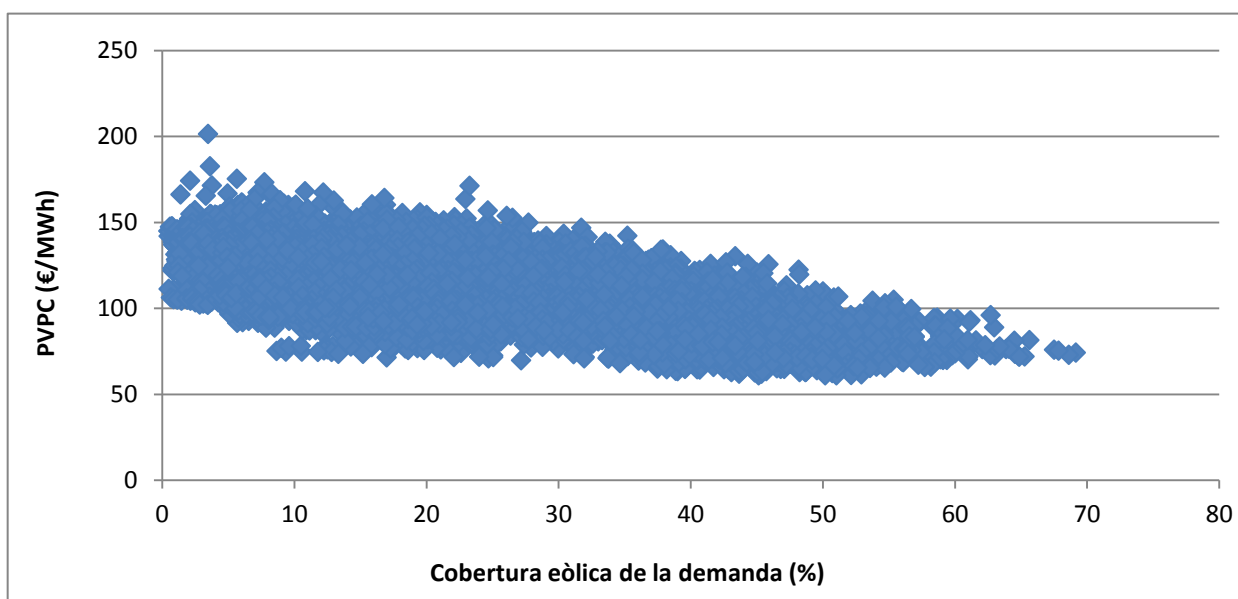


Figura 13. Preu del PVPC respecte la cobertura eòlica de la demanda. Valors horaris.

Tot i que la tendència és molt clara, si s'obté el coeficient de determinació, aquest no presenta un valor gaire bo ($R^2=0,4329$); però, tot i així, es pot afirmar que l'energia eòlica suposa uns guanys importants al dia a dia dels ciutadans, ja que cada vegada que la demanda s'ha cobert, en bona part, per aquesta font d'energia, el preu de l'electricitat es veu reduït molt considerablement.

D'altra banda, entrant en detall de què succeeix en cadascun dels mesos, s'han estudiat els quatre indicadors esmentats a partir de les seves mitjanes mensuals i trimestrals. D'aquesta manera, s'ha pogut esclarir en quins moments de l'any l'energia eòlica provoca un estalvi més gran per les llars i en quines èpoques no tant.

En primer lloc, es presenta l'anàlisi comparativa entre la quantitat d'energia eòlica generada i el valor del preu de l'energia al mercat *spot*. Tot plegat, a partir de les seves mitjanes trimestrals.

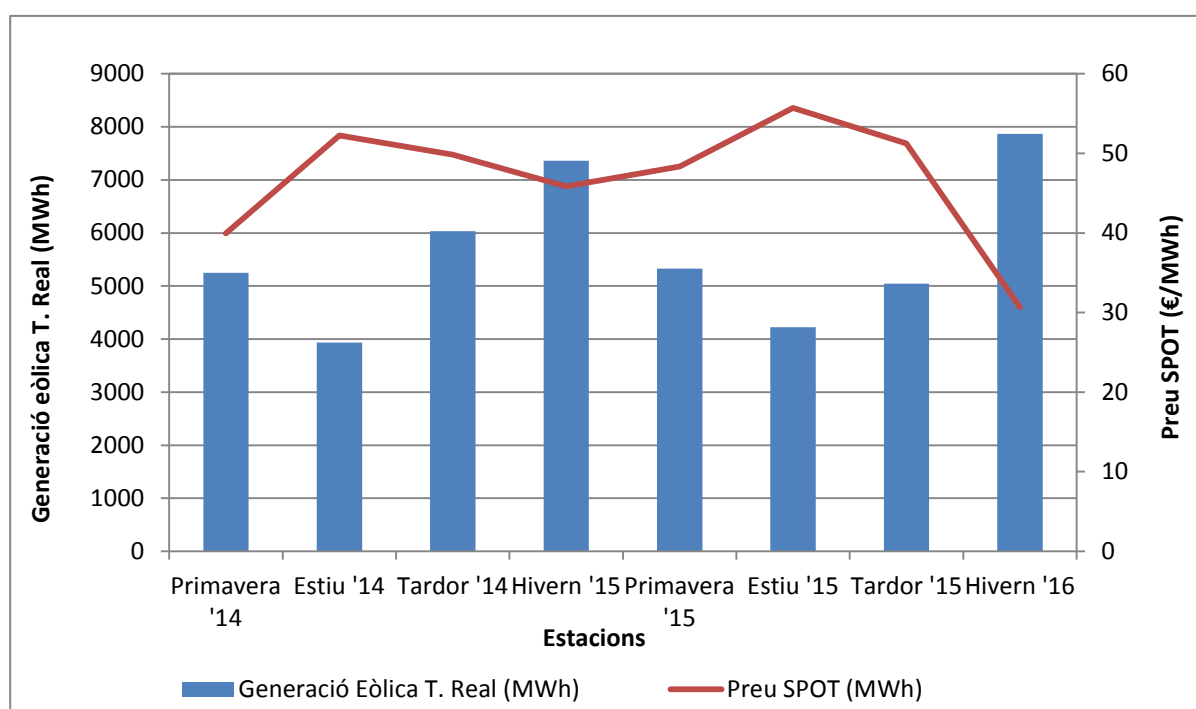


Figura 14. Preu de l'energia al mercat spot en relació a la quantitat d'energia eòlica generada. Valors mitjos trimestrals.

Tot i que el preu de l'energia al mercat *spot* no és la xifra econòmica que arriba a les cases, la seva variació trimestral és un millor indicador que no pas el preu del PVPC, en què les diferències d'un trimestre a l'altre queden més ocultes degut a impostos i peatges d'accés.

En canvi, com es pot comprovar a la figura 14, l'efecte que produeix l'energia eòlica sobre el mercat elèctric és força significatiu. El preu de l'energia assoleix els valors màxims als mesos estivals, precisament quan la generació eòlica és més reduïda. I, d'altra banda, quan aquesta quantitat d'energia generada és molt elevada (entre 7.000 i 8.000 MWh de mitjana trimestrals), el cost al mercat *spot* de l'energia presenta uns valors més petits.

Aquest gran benefici d'injectar com més energia eòlica al mercat millor s'observa especialment al darrer trimestre analitzat (hivern del 2016). En aquest període, la mitjana de gener, febrer i març de 2016, el preu mig del *pool* va ser de 30 €/MWh, gairebé la meitat que als tres mesos d'estiu de 2015 (55 €/MWh).

Tot i així, com s'ha esmentat, aquest no és el preu que paguem cadascú de nosaltres per l'electricitat. Per tant, cal comprovar ara el pes real que té la generació eòlica a la tarifa regulada del PVPC.

Per fer-ho, es mostren els diferents valors trimestrals de generació d'energia eòlica, preu al mercat *spot* i preu del PVPC, juntament amb els percentatges de variació (de cada xifra) respecte el trimestre anterior. Degut a que el PVPC és una factura regulada que entra en vigor l'1 d'abril de 2014, no es presenta el percentatge de variació dels respectius indicadors de la primavera de 2014 respecte l'hivern de 2014.

Taula 6. Variació de la generació eòlica, preu al mercat *spot* i preu del PVPC respecte el seu trimestre anterior. Valors mitjos trimestrals.

	Generació eòlica (MWh)	Variació Gen. Eòlica (%)	Preu mercat <i>spot</i> (€/MWh)	Variació <i>spot</i> (%)	Preu del PVPC (€/MWh)	Variació PVPC (%)
Primavera '14	5.247,41	-	39,96	-	107,69	-
Estiu '14	3.933,50	-25,04	52,27	+30,79	121,81	+13,11
Tardor '14	6.035,46	+53,44	49,83	-4,66	122,10	+0,24
Hivern '15	7.360,28	+21,95	45,86	-7,95	119,49	-2,14
Primavera '15	5.329,67	-27,59	48,36	+5,44	120,77	+1,08
Estiu '15	4.226,60	-20,70	55,71	+15,20	124,08	+2,73
Tardor '15	5.043,57	+19,33	51,24	-8,03	118,99	-4,10
Hivern '16	7.866,50	+55,97	30,67	-40,14	93,86	-21,12

Amb aquesta taula es pot observar molt clarament com gairebé sempre que la generació d'energia eòlica s'incrementa respecte el trimestre anterior, tant el preu del *pool* com el del PVPC es redueixen. I viceversa: quan es genera menys eòlica, els dos preus augmenten.

La variació percentual, però, no és la mateixa pels indicadors monetaris. Mentre que la diferència al mercat *spot*, per cada trimestre, és molt ostensible (percentatge de variació força grans tant positius com negatius), pel cas del PVPC els increments o decrements són més suaus. Únicament per l'últim trimestre la variació percentual és remarcable: el cost de la tarifa regulada és un 21% més barata que el darrer trimestre de 2015, després d'haver-se generat un 56% més d'energia eòlica respecte aquests mateixos tres mesos.

Tot i així, es podria dir que aquest darrer trimestre no ha estat gaire normal, ja que des del juliol de 2014 fins el desembre de 2015, el preu del PVPC ha oscil·lat entre els 119 i els 124 €/MWh. Per tant, el fet que en aquest hivern aquest valor fos de 93,86 €/MWh es pot considerar un fet excepcional. Tot i així, cal remarcar que es tracta d'una gran senyal i caldrà veure si té continuïtat als següents trimestres.

Si es divideix en mesos aquesta anàlisi que s'ha desenvolupat per trimestres, es pot obtenir una idea més concreta d'allò que ha anat succeint cada mes en termes de cobertura eòlica i preu del mercat *spot* de l'electricitat. Com ja s'ha vist, aquests dos indicadors estan relacionats indirectament; caldrà veure, però, en quin grau ho fan.

Seguidament, per tant, es determinarà el coeficient de correlació r a partir de la covariància i de les desviacions estàndard dels dos paràmetres. Elevant al quadrat aquest valor de r obtingut (que forçosament ha de ser negatiu, ja que són indirectament proporcionals), s'obté el coeficient de determinació R^2 , que permetrà comprovar la qualitat de la relació entre les dues magnituds.

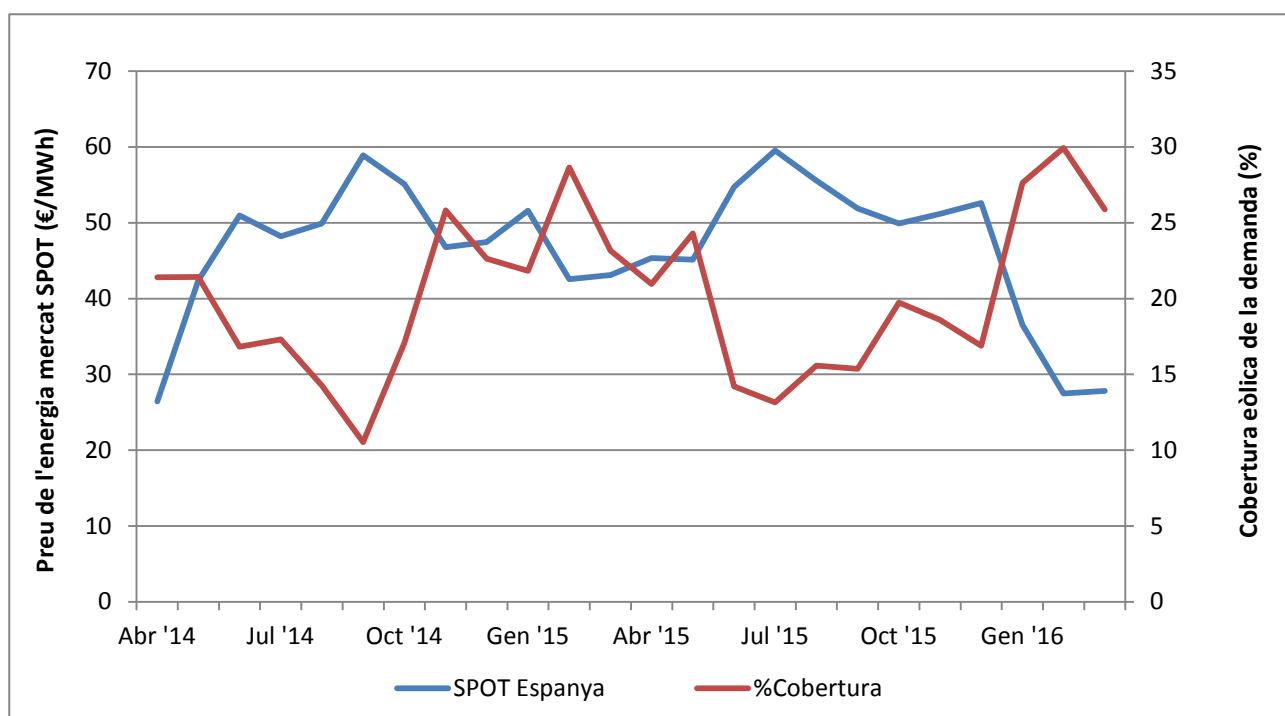


Figura 15. Evolució mensual de la cobertura eòlica de la demanda i del preu de l'energia al mercat spot.

On:

- Covariància: $S = -37,263$
- Desviació estàndard cobertura eòlica: $S_{COB} = 5,213$
- Desviació estàndard *spot*: $S_{SPOT} = 9,2487$
- Coeficient de correlació: $r = S / (S_{COB} \cdot S_{SPOT}) = -0,7728$
- Coeficient de determinació: **$R^2 = 0,5972$**

En aquest cas, el coeficient R^2 és millor que en l'estudi de la figura 13 (en què l'anàlisi era amb valors horaris i utilitzant l'indicador del PVPC), però tampoc es pot considerar gaire representatiu, ja que ni tan sols arriba al 0,6.

D'altra banda, es torna a comprovar l'efecte ja esmentat: com és puja la generació eòlica, més baixa el preu del *pool*. I, sobretot, aquest fenomen es produeix en els dos mesos de febrer analitzats, en què la cobertura de la demanda amb eòlica frega el 30% pels dos casos i el preu de l'energia és quan és més baix (sobretot a febrer de 2016, on és inferior als 30 €/MWh).

En contraposició es troben els mesos de setembre de 2014 i juliol de 2015. En ells, la cobertura eòlica presenta els valors mínims de tot el període (menys del 15%) i, precisament, el cost de l'energia al mercat *spot* té els valors màxims, assolint gairebé els 60 €/MWh.

Com ja s'ha anat veient, els últims tres mesos analitzats (gener, febrer i març de 2016) han estat molt rellevants pel que fa a la generació i cobertura eòlica. De fet, han situat aquesta font d'energia renovable com a la primera de tot el mix energètic peninsular aquest trimestre. Per obtenir una idea de l'estalvi que aquest augment ha suposat en les butxaques dels espanyols, s'ha realitzat la comparació amb el mateix trimestre de l'any anterior.

Taula 7. Variació de la cobertura eòlica de la demanda i el preu del PVPC del primer trimestre de 2015 al primer trimestre de 2016.

	Cobertura eòlica 2015 (%)	Cobertura eòlica 2016 (%)	Variació (%)	PVPC 2015 (€/MWh)	PVPC 2016 (€/MWh)	Variació (%)
Gener	21,83	27,63	+26,56	126,33	100,59	-20,37
Febrer	28,65	29,93	+4,47	115,63	90,28	-21,92
Març	23,17	25,89	+11,74	116,13	90,49	-22,08
MITJANA TRIMESTRE	24,90	27,78	+11,56	119,49	93,86	-21,44

Aquestes dades presentades a la taula 7 reafirmen, per tant, allò que s'havia vist a les figures anteriors: la cobertura eòlica de la demanda ha assolit registres rècord aquest any 2016. La climatologia (sobretot pel que fa al vent i l'aigua) ha afavorit l'increment de producció renovable, essent l'eòlica la principal. Tot i que aquest augment de l'eòlica ja és habitual a principis de cada any, pel 2016 ha estat especialment destacat.

Aquest fet, entre d'altres, ha comportat que la reducció en la tarifa del PVPC hagi estat molt important; concretament, de més del 21% respecte els tres primers mesos de 2015.

Pel que fa a la cobertura de la demanda amb l'energia eòlica, aquesta diferència d'un any a l'altre també ha estat significativa. Un augment de l'11% de mitjana, gràcies sobretot a la millora que s'ha produït en el mes de gener (un 26,56% d'augment respecte el 2015).

Concentrant l'anàlisi per a cadascun dels mesos, s'observa que les variacions percentuals dels dos indicadors no van en consonància. Mentre la cobertura presenta uns percentatges més extrems, des del 26,56% al gener fins al 4,47% al febrer, el PVPC baixa però dintre d'uns paràmetres més estables, sempre entre el 20 i el 22% de mitjana per els tres mesos.

Traduït a xifres més comunes, si una llar mitjana de quatre persones consumeix aproximadament 300 kWh/mes d'electricitat, l'estalvi que li ha comportat aquests primers tres mesos de 2016 respecte l'any passat és el següent:

Taula 8. Estalvi obtingut en la tarifa del PVPC d'un consumidor mitjà en el primer trimestre de 2016 respecte el mateix període de 2015.

	Cost tarifa 2015 (€)	Cost tarifa 2016 (€)	Estalvi (€)
Gener	37,90	30,18	7,72
Febrer	34,69	27,08	7,61
Març	34,84	27,15	7,69
TOTAL	107,43	84,41	23,02

Gràcies a un estalvi d'entre 7 i 8 € mensuals, al final de març de 2016, un consumidor mitjà a Espanya s'havia estalviat més de 23€ als tres primers mesos de 2016 respecte l'any anterior. Un estalvi que podria ser més significatiu si la importància del cost de l'energia a la factura de la llum fos més rellevant, i no únicament del 38%.

Tot i que hi ha molts altres factors que determinen aquesta reducció del PVPC, sí que s'ha demostrat que la generació de més o menys energia renovable (amb l'eòlica al capdavant) n'és fonamental.

Per què l'energia eòlica abarateix el preu de l'energia i en quin grau ho fa?

Com s'ha vist, el preu que estem pagant com a ciutadans cada hora per consumir electricitat està certament reduït gràcies a que existeixen renovables al nostre país. I, com és sabut, la principal d'aquestes és l'energia eòlica.

La resposta de la procedència d'aquest abaratiment rau en la penetració que té l'eòlica en el mercat elèctric espanyol. Com ja s'ha comentat en el punt 2.2.2 del projecte, les energies renovables tenen prioritat d'accés en aquest mercat diari de l'energia (realitzen les seves ofertes sempre a 0 €/MWh). Això comporta que la corba d'oferta es desplaci significativament cap a la dreta amb la conseqüència que el punt de cassació entre l'oferta i la demanda es troba considerablement més avall. Així doncs, per a cada hora, es pagarà menys per l'energia.

Segons dades de l'Associació Empresarial Eòlica (AEE), sense la presència de l'energia eòlica, els 248 TWh de demanda energètica peninsular l'any 2015 haurien costat 2.952 milions d'euros més. Extraient-ne d'aquests els incentius

que rep la tecnologia eòlica, l'estalvi net que es va produir, per tot el 2015, va ser de gairebé 1.700 milions d'euros.

Per tant, si es vol seguir en aquesta línia (i, fins i tot, millorar-la) el camí és evident: establir polítiques per afavorir i incrementar la importància de les renovables (i del seu sector més madur, l'eòlica) en el nostre sistema.

3.2.3. Evolució de les emissions contaminants

La generació d'energia elèctrica a través de plantes alimentades per petroli, gas natural o carbó són un dels principals factors d'emissió de CO₂ a l'atmosfera. Com és conegut, la concentració d'aquest gas (considerat el principal causant de l'efecte hivernacle) ha anat pujant de manera extraordinària al llarg del segle XX i fins al moment actual, a mesura que l'activitat frenètica de l'ésser humà no ha tingut miraments, únicament per intentar assolir el seu benestar.

Com a font d'energia renovable, l'energia eòlica té un efecte mitigador d'aquestes emissions contaminants. Evidentment, com més percentatge de la demanda energètica sigui coberta per fonts renovables, menys ho serà per les fonts convencionals, de manera que es redueixen les emissions de CO₂ a l'atmosfera.

Per contrastar aquesta idea s'ha dut a terme aquesta tercera anàlisi, en la qual s'observa si aquest efecte reductor és tan considerable com sembla. Per fer-ho, s'han emprat els següents quatre indicadors:

- Generació d'energia eòlica en temps real (MWh).
- Cobertura eòlica de la demanda (%).
- Quantitat d'energia que és generada lliure de CO₂ (MWh).
- Percentatge del total d'energia que és generada sense emetre CO₂ (%).

En primer lloc, a diferència del punt anterior, es mostra l'anàlisi global dels dos anys però en aquest cas a través dels valors de tots els dies. Així doncs, amb la representació de 731 punts, s'obté una visió clara i general de com n'és de rellevant l'augment de la cobertura eòlica pel medi ambient.

A més, també es presenta la línia de tendència juntament amb el coeficient R², que permetrà observar la bondat d'aquest ajust lineal del model.

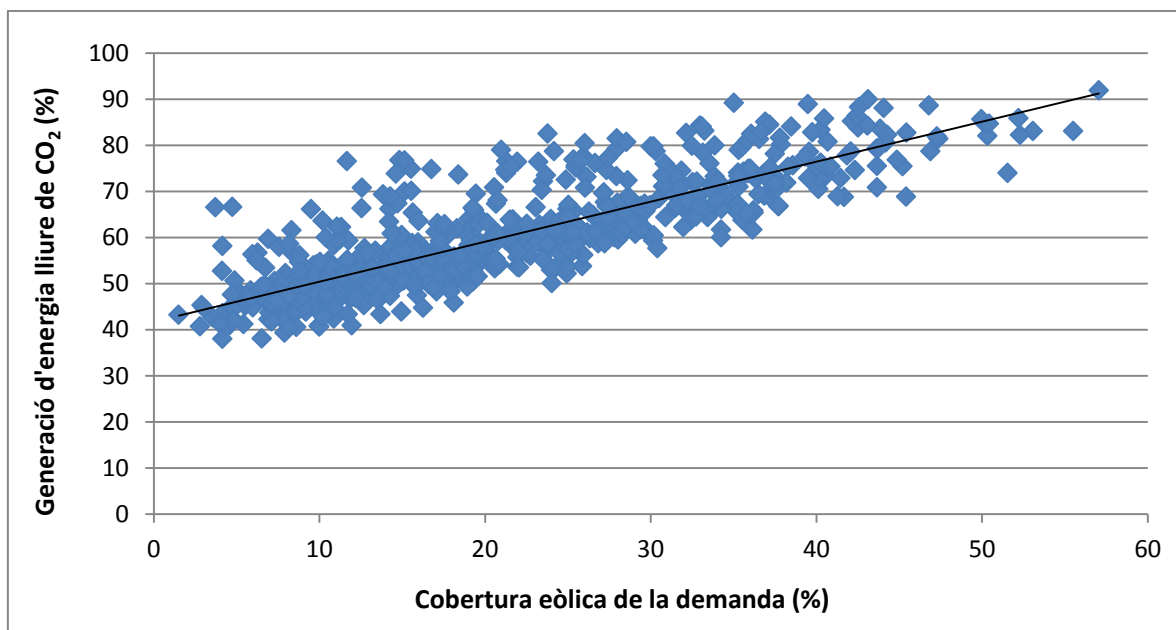


Figura 16. Percentatge de generació d'energia lliure de CO₂ respecte la cobertura eòlica de la demanda. Valors diaris.

On:

- Línia de tendència: $0,8677 \cdot x + 41,75$
- Coeficient de determinació: $R^2 = 0,7061$

Es comprova, per tant, la forta relació directa entre els dos indicadors: com més augmenta el pes de l'energia eòlica en el sistema de generació, més s'incrementa el percentatge de l'energia total que és generada sense emetre CO₂. És a dir, es reafirma l'idea general de com més eòlica, menys CO₂ i menys contaminació atmosfèrica.

En xifres, s'observa de manera aproximada que si la cobertura eòlica és inferior al 15%, l'energia que es genera lliure de CO₂ és menys de dos terços del total. D'altra banda, en tots els dies que la cobertura eòlica s'ha incrementat fins a més del 30%, el percentatge d'energia lliure puja significativament, de manera que mai és inferior al 60%.

Aquesta gran correlació entre els dos paràmetres comparats ho demostra el fet que el coeficient de determinació supera la frontera del 0,7; fet que permet corroborar que un ajust lineal de la tendència s'aproxima força al model que s'està descrivint.

Per altra part, també s'han considerat variables no percentuals per aquest estudi: la generació eòlica en temps real i la generació d'energia lliure de CO₂. La comparació d'aquests dos indicadors, lògicament, també deixa entreveure la seva relació directa, però en aquest cas, duent a terme l'anàlisi amb les mitjanes trimestrals, s'observa una correlació encara més forta (un R^2 més elevat).

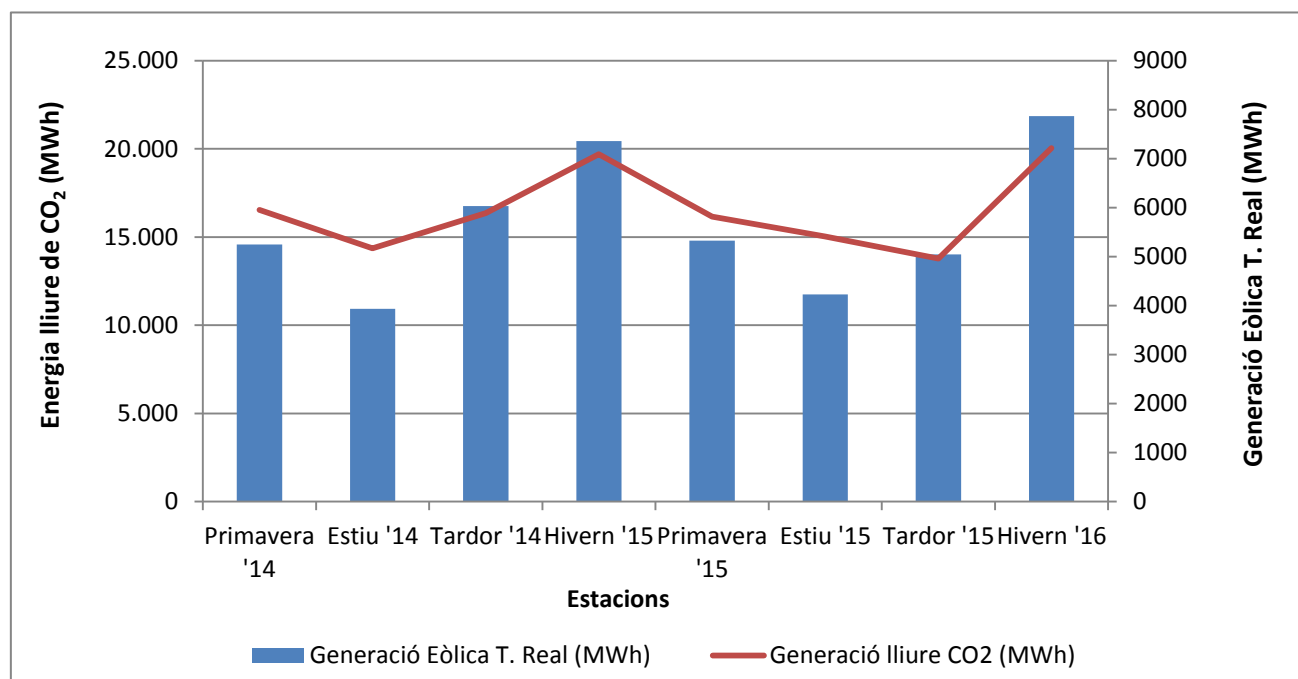


Figura 17. Evolució trimestral de la generació eòlica i l'energia generada lliure de CO₂.

On:

- Covariància: $S = 2967186$
- Desviació estàndard Generació Eòlica: $S_{\text{GEN. EOL.}} = 1393,265$
- Desviació estàndard Energia lliure de CO₂: $S_{\text{EN. LLIURE}} = 2299,953$
- Coeficient de correlació: $r = S / (S_{\text{GEN. EOL.}} \cdot S_{\text{EN. LLIURE}}) = 0,925960$
- Coeficient de determinació: **$R^2 = 0,857401$**

A part de comprovar l'alt nivell correlatiu entre els dos paràmetres, aquesta figura 17 deixa dos altres aspectes a considerar. En primer lloc, i en aquest mateix sentit, que en tots els trimestres la relació és directe (si un puja l'altre també, i viceversa) exceptuant a la tardor de 2015. En aquests mesos d'octubre, novembre i desembre, de mitjana, mentre la generació eòlica s'incrementa respecte el trimestre anterior, l'energia generada sense emetre CO₂ és inferior, fet que comporta que fos el trimestre més contaminant dels darrers dos anys.

En segon lloc, s'observa també la importància que té l'energia eòlica dintre les fonts que ajuden a evitar emissions contaminants. Al darrer hivern, per exemple, dels 20.000 MWh generats, de mitjana, sense CO₂, gairebé 8.000 provenien de la generació eòlica (40%). En canvi, és en els períodes d'estiu on aquest percentatge és més reduït, al voltant del 28%.

Amb tot plegat, per tant, es comproven tant els beneficis econòmics com mediambientals que comporta l'increment de la generació d'energia eòlica al sistema energètic peninsular espanyol.

3.2.4. Anàlisi d'un dia típic

Un cop analitzats els diferents indicadors des d'un punt de vista global, observant com es veu afectada cada variable al llarg dels dos anys estudiats, s'ha cregut oportú concentrar l'estudi en una franja de 24 hores. D'aquesta manera, s'ha analitzat quina era l'evolució de cada paràmetre al llarg d'un dia típic. Aquest dia mitjà s'ha determinat tant pel període de dos anys com per les respectives estacions meteorològiques.

Així doncs, per fer-ho, s'han organitzat tots els valors horaris del període bianual en 24 punts. Cadascun d'aquests punts representa la mitjana d'una hora del dia: hora 00:00, hora 01:00, hora 02:00, etc. A més, per contrastar les evolucions de com és un dia típic a les diferents èpoques de l'any, s'ha seguit el mateix procediment però organitzant-los en estacions, de manera que s'ha obtingut el dia típic de primavera, d'estiu, de tardor i d'hivern.

En els dos estudis, però, s'han dut a terme les mateixes comparacions entre indicadors:

- Evolució de la generació eòlica en relació a la demanda total d'energia.
- Variació de la cobertura eòlica de la demanda i la seva afectació al preu del PVPC.

Dia típic: període abril 2014 – març 2016

El primer dels dos anàlisis, com s'ha esmentat, tracta tots els valors del període sencer: les 17.544 hores agrupades en 24 valors. I dins d'aquest estudi, s'ha començat per observar l'evolució de la generació eòlica al llarg del dia i alhora comprovar la seva importància en la cobertura de la demanda.

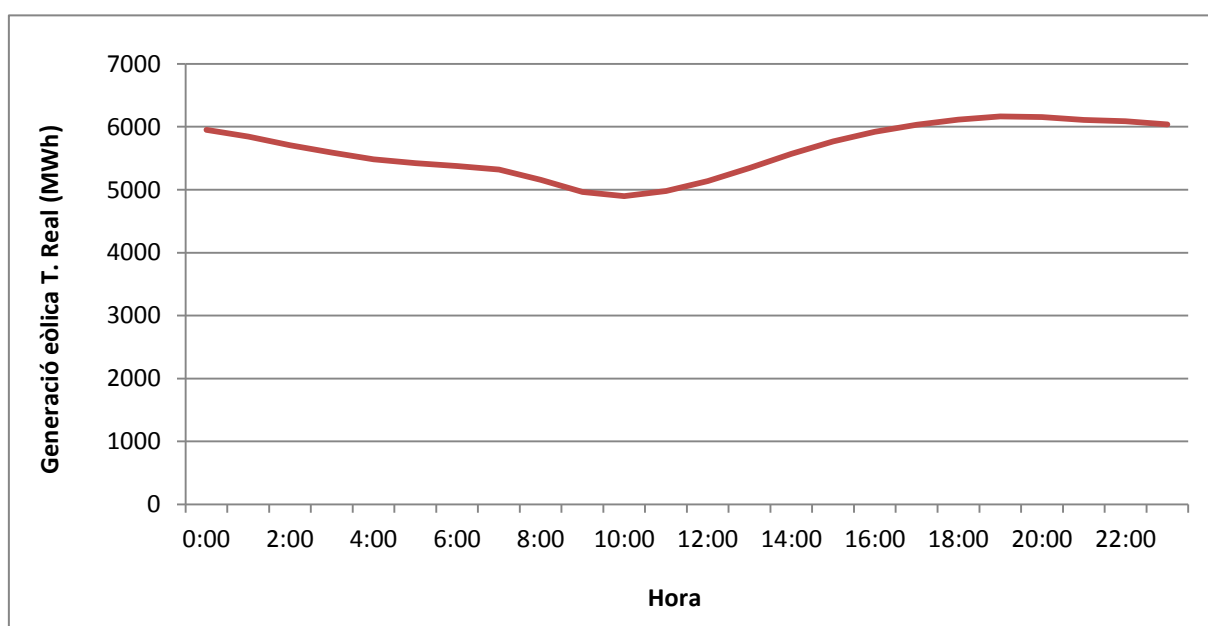


Figura 18. Generació eòlica per un dia típic del període abril '14 – març '16.

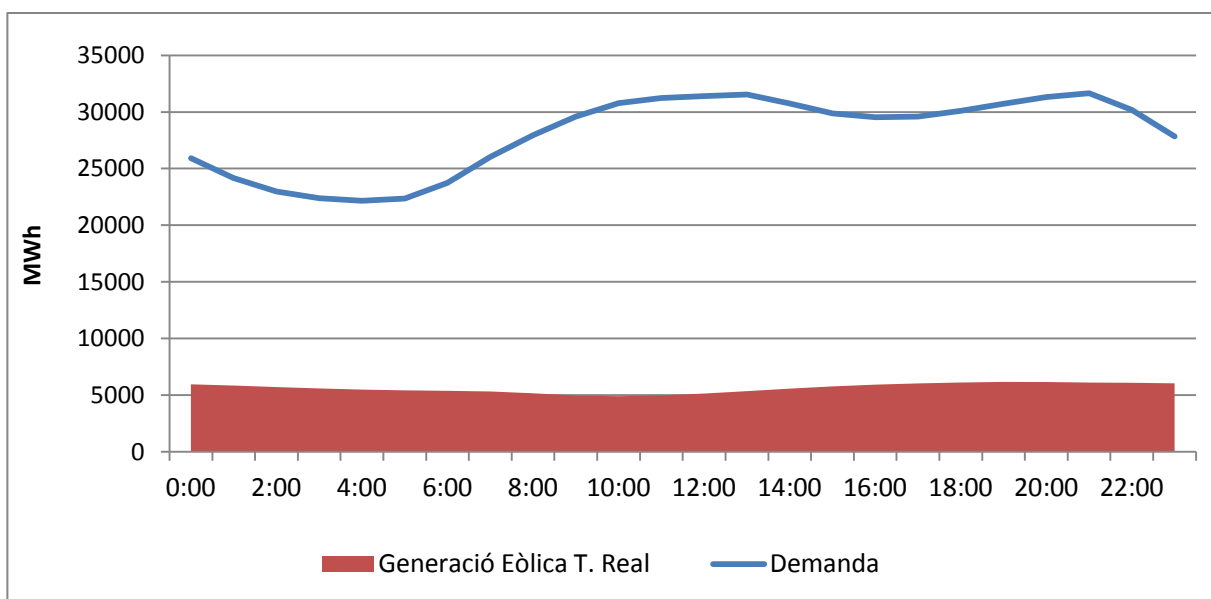


Figura 19. Generació eòlica i la seva aportació a la cobertura de la demanda per un dia típic del període abril '14 – març '16.

S'observa la petita l'oscil·lació que té, per a un dia mitjà, la generació eòlica: des dels 5.000 MWh al voltant de les 10 del matí fins als 6.000 MWh entre les 5 de la tarda i les 12 de la nit. Per contra, la demanda d'energia té variacions més fortes al llarg del dia, amb hores vall per sota dels 25.000 MWh (fins les 7 del matí) i hores punta per sobre dels 30.000 MWh (al migdia i vespre).

Per tant, la importància que té l'energia eòlica en la cobertura de la demanda, com s'observa en la figura següent, és també molt variable. A part, també es compara l'indicador de la cobertura eòlica amb l'evolució del preu del PVPC.

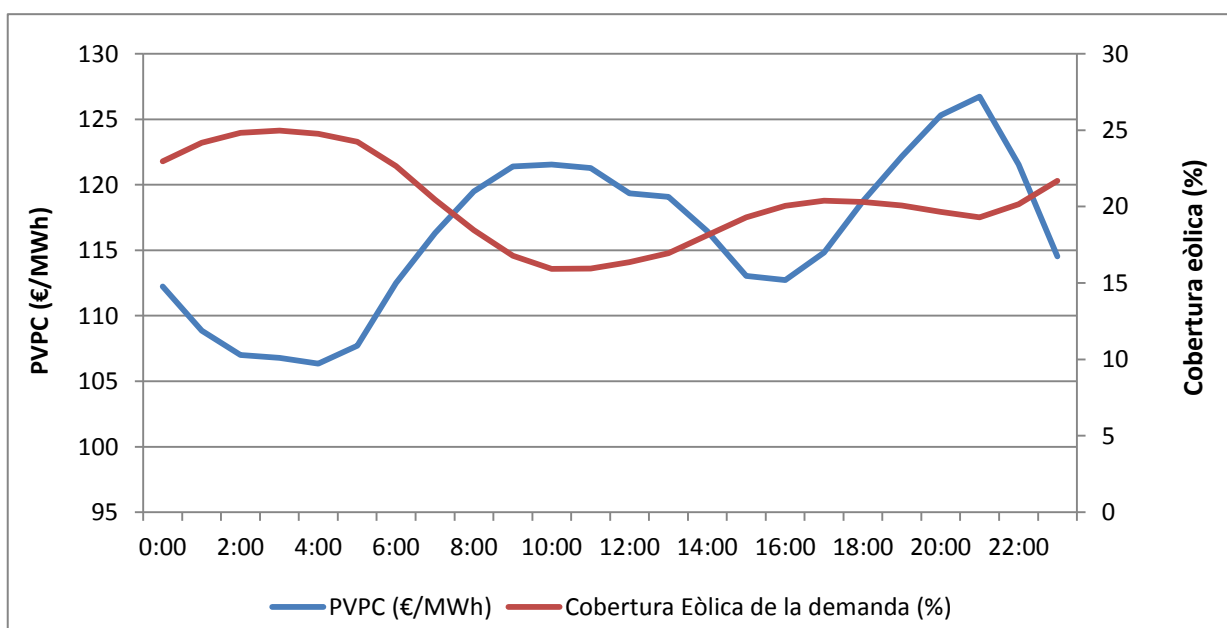


Figura 20. Cobertura de la demanda amb eòlica i preu del PVPC per un dia típic del període març '14 – abril '16.

A part de comprovar una altra vegada la relació indirecta entre la cobertura eòlica i el preu de la tarifa del PVPC, en aquesta figura 20, també s'hi pot veure com evolucionen aquestes variables al llarg de totes les hores d'un dia estàndard. Es comprova que les hores de més cobertura eòlica es troben abans de les 7 del matí, amb percentatges d'entre el 22 i 25%. Aquest augment del pes de l'eòlica a les hores vall de demanda és degut a que es tracta d'unes hores en què no hi ha altres mitjans disponibles diferents a les renovables.

Lògicament, són també en aquestes hores del dia quan el preu de l'electricitat és més barata (menys de 115 €/MWh). L'hora punta d'aquest indicador es troba a les 20 i 21 h, moment en què aquest valor monetari s'enfila fins a més de 125 €/MWh.

Si es comparen les figures 19 i 20, a més, es pot observar com la demanda d'energia i el preu del PVPC van en consonància al llarg del dia. Un aspecte força obvi: quan es requereix més energia, és quan més cara es ven, i viceversa. Aquesta tendència, però, tot i ser força general, no és fixa. I és que mentre la demanda d'energia al migdia (11, 12, 13 i 14 h) és la mateixa que al vespre (20 i 21 h), al voltant dels 31.000 MWh; el preu d'aquesta no és igual en els dos moments, ja que al vespre és uns 5 €/MWh més car.

D'altra banda, també es pot veure com en els moments d'alta demanda d'energia, el pes eòlic en el sistema energètic és quan és més reduït. Sobretot succeeix en el cas de les hores del migdia, moment en què la demanda és màxima i, per contra, la cobertura d'aquesta amb energia eòlica és únicament d'entre el 15 i el 17%. I és que, en aquelles hores, contràriament al què passa de matinada, totes les fonts de generació d'energia ja estant en funcionament.

Dia típic: Estacions meteorològiques

Per dur a terme aquesta anàlisi, s'han dividit totes les dades en funció del període en què han estat preses. Així doncs, pel cas dels mesos primaverals, tots els valors dels mesos d'abril, maig i juny (tant de 2014 com de 2015) s'han agrupat i, procedint de la mateixa manera que en l'apartat anterior, se n'ha obtingut el dia típic; en aquest cas, el dia típic de primavera. De manera successiva, s'han determinat els dies típics per l'estiu (mesos de juliol, agost i setembre de 2014 i 2015), la tardor (octubre, novembre i desembre de 2014 i 2015) i l'hivern (gener, febrer i març de 2015 i 2016).

Amb tot plegat, a través de l'estudi comparatiu entre la generació eòlica, la demanda (i la seva cobertura amb eòlica) i el preu del PVPC, es podrà comprovar si l'evolució diària és molt diferent depenent de l'època de l'any. La finalitat serà, doncs, la de dibuixar un panorama més adequat a la realitat que el mostrat en l'anàlisi d'un dia típic pel període sencer, on possiblement les característiques extremes d'una estació meteorològica amagaven les que es produïen a l'època oposada de l'any.

Per agilitzar la presentació dels respectius indicadors, s'han agrupat les corbes d'evolució de les quatre estacions meteorològiques en un mateix gràfic. En el primer (figura 21), es poden comprovar clarament les oscil·lacions que es produeixen al llarg del dia pel que fa a la generació eòlica, depenent de l'època de l'any.

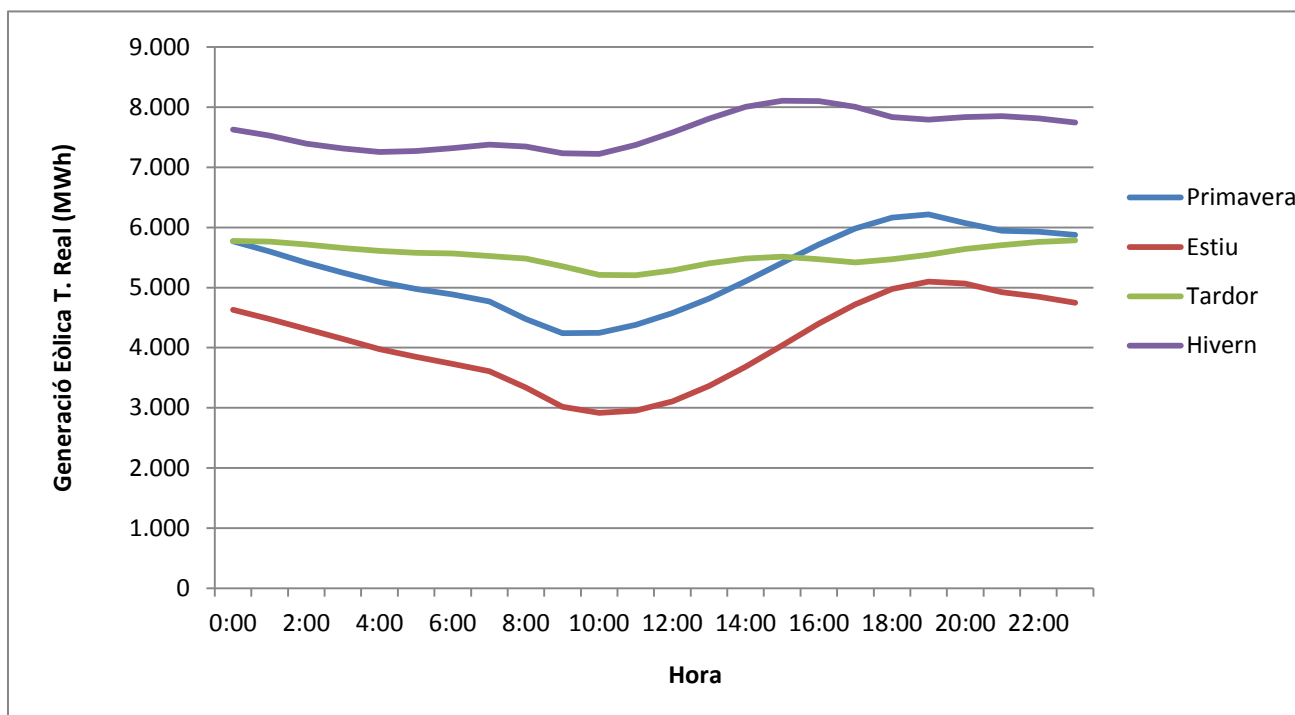


Figura 21. Evolució de la generació eòlica per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern.

A banda de tornar a comprovar en quina estació és genera més eòlica i en quina ho fa menys, l'aspecte interessant d'aquesta figura 21 és la diferenciació clara entre un dia típic de primavera o estiu respecte un de tardor o hivern.

Com s'observa, les característiques de la generació eòlica al llarg d'un dia de primavera són idèntiques a les d'un dia d'estiu, amb la diferència d'uns 1.000 MWh més per la primera. Així doncs, els moments més baixos de generació succeeixen a les mateixes hores (entre les 9 i les 12 del matí), mentre els punts alts es troben al voltant de les 19h.

D'altra banda, pels mesos d'octubre a març (tardor i hivern) s'hi veuen altres particularitats. La principal, és la petita oscil·lació que es produeix al llarg de tot el dia: a la tardor, la generació eòlica es mou entre els 5.200 i 5.800 MWh i, a l'hivern, entre els 7.200 i 8.100 MWh. Per tant, les hores punta i vall d'aquestes dues estacions estan menys marcades. Tot i així, pel cas de l'hivern sí que s'observa un punt alt generació entre les 15 i 16 h, contràriament a la resta d'èpoques de l'any, en les quals aquest fet es produeix unes 3h més tard.

Seguidament s'ha passat a analitzar la resta de paràmetres: les corbes de demanda d'energia, la seva cobertura amb eòlica i el preu del PVPC. I es presenta amb la mateixa tònica que en aquest cas, cada indicador en un mateix gràfic representant la seva evolució a les quatre estacions meteorològiques.

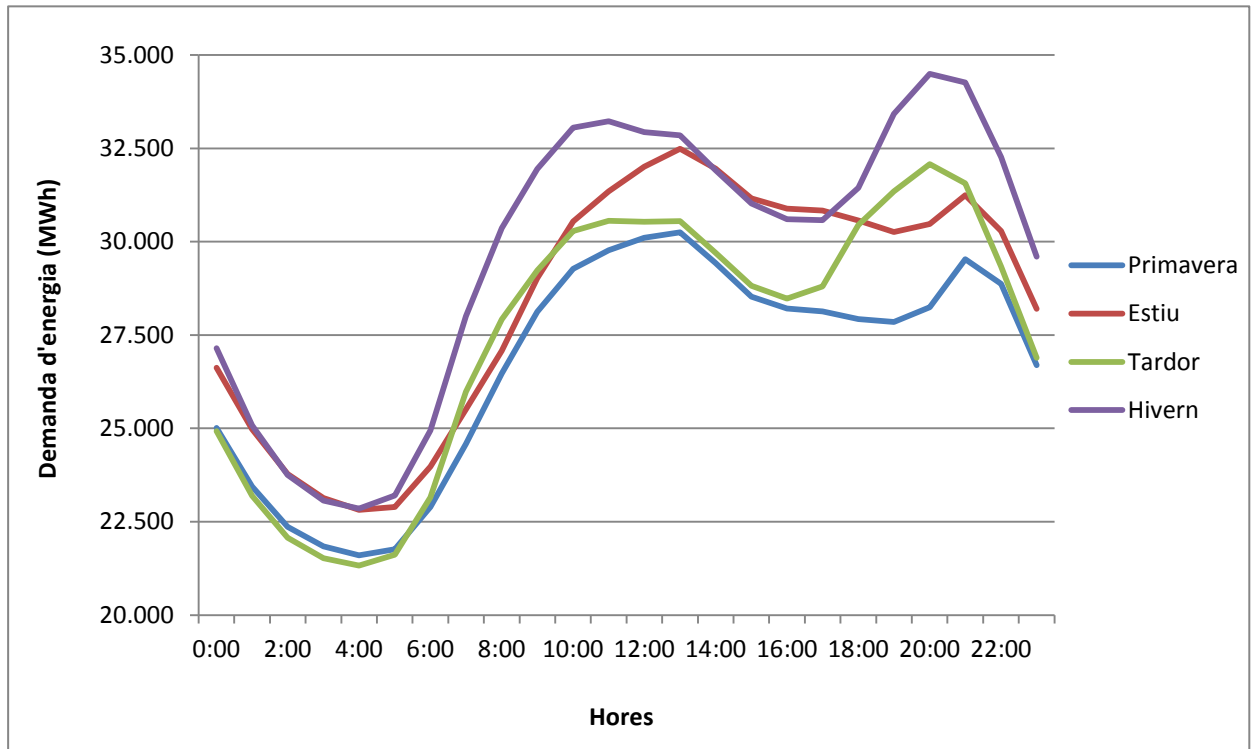


Figura 22. Corbes de demanda per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern.

A diferència de la generació eòlica, que era relativament més constant al llarg del dia, en aquest cas la demanda d'energia pateix moltes oscil·lacions en aquestes 24h. Així doncs, s'observen uns clars moments de demanda molt reduïda (entre la 1 i la 6 de la matinada), i hores de demanda punta (al migdia i vespre).

En aquest darrer sentit, es presenta una demanda més elevada al vespre pel cas de la tardor i l'hivern (quan fa més fred i es necessita més energia per escalfar) i, en canvi, pels mesos de primavera i estiu, es requereix més energia al migdia, moment en què fa més calor i l'energia per refrigerar es fa més necessària.

Per tant, si com s'ha vist a la figura 21, les corbes de generació eòlica són poc oscil·latòries i, per contra, com es presenta a la figura 22, la demanda d'energia és molt diferent al llarg d'un dia, la cobertura eòlica d'aquesta demanda també variarà molt depenent de si es tracta del matí, migdia, tarda o vespre.

De la mateixa manera, la variabilitat del preu de l'energia també hauria de ser important tant entre les respectives hores del dia com entre les diferents estacions meteorològiques.

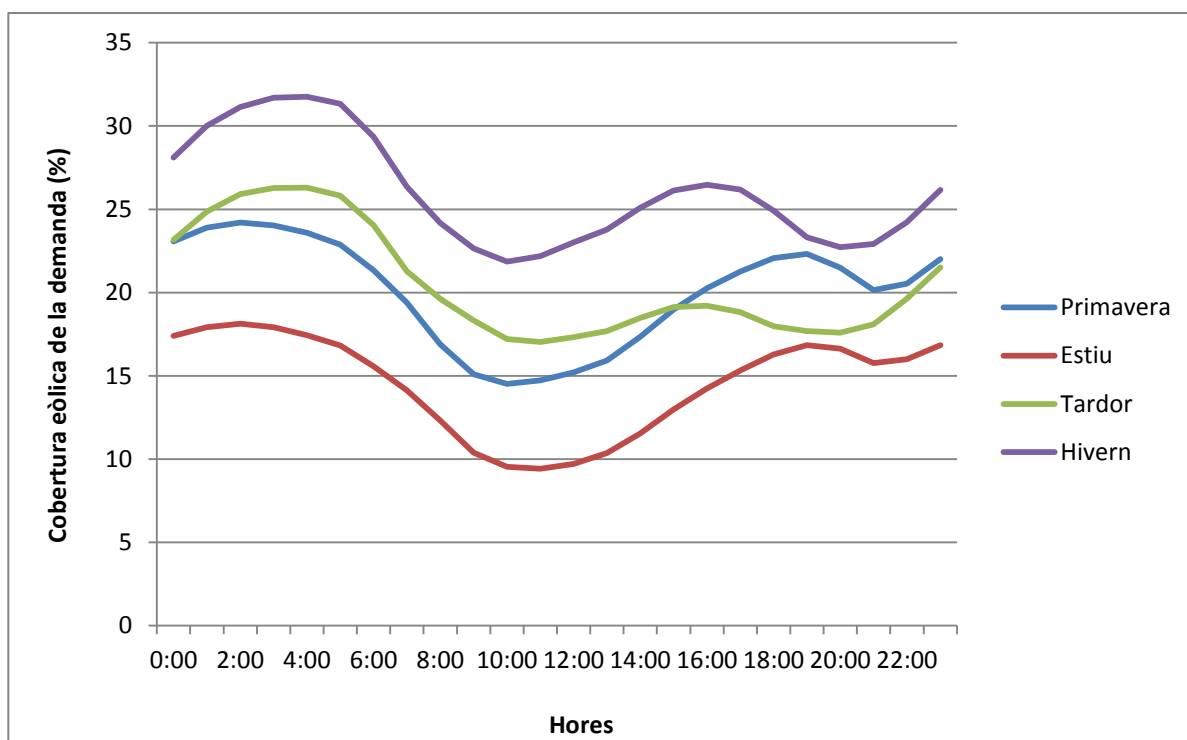


Figura 23. Cobertura eòlica de la demanda per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern

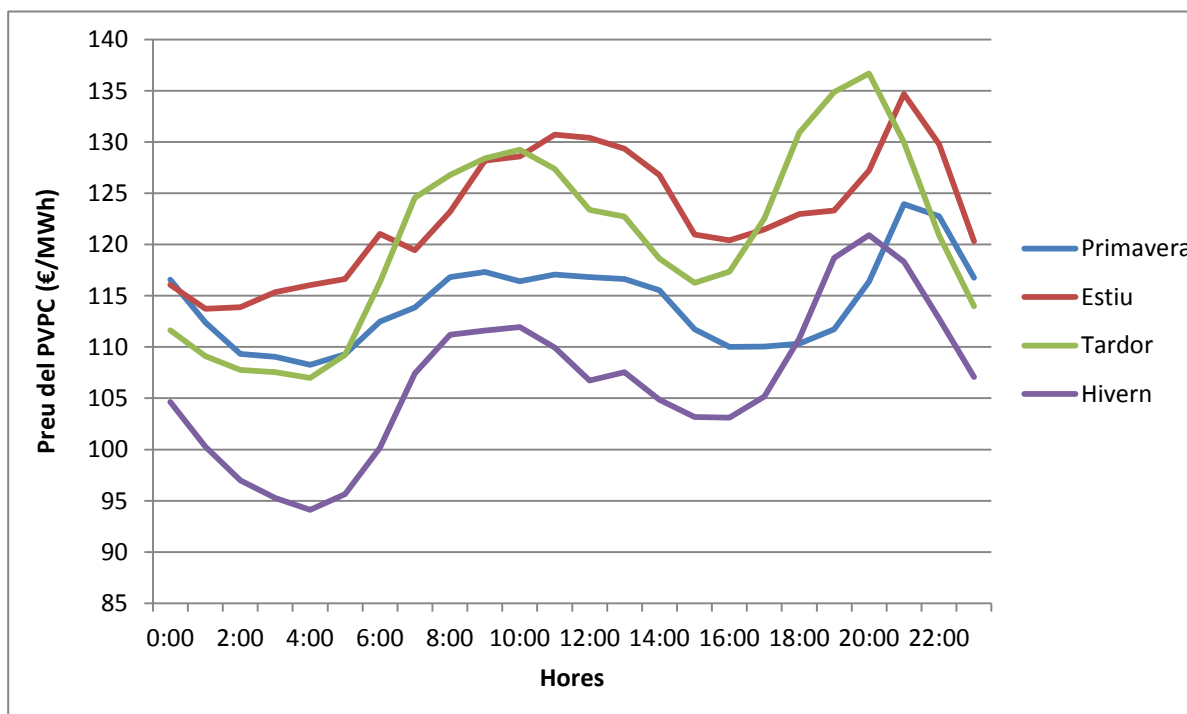


Figura 24. Preu del PVPC per un dia típic de primavera, estiu, tardor i hivern.

Com s'havia intuït, les corbes de cobertura eòlica segueixen unes trajectòries gairebé oposades a les que tracen les corbes de demanda. Tal i com s'havia vist a l'estudi del període sencer, al llarg del dia, quan la demanda d'energia és més baixa, és quan l'eòlica té més importància al sistema mix peninsular. D'altra banda, a les hores punta de demanda (migdia i vespre), la cobertura eòlica perd pes.

Fent la diferenciació per estacions, l'hivern es manté sempre com l'època de més cobertura al llarg de tot el dia, amb pics de més del 30% en algunes hores de la matinada i mínimes del 22%. Per contra, en un dia típic d'estiu no s'assoleix mai el 20% de la cobertura en cap hora del dia i, fins i tot, durant tres hores del matí està per sota del 10%. Pel que fa a la primavera i a la tardor, els valors són menys extrems i força similars entre ells, oscil·lant entre el 15 i el 26% al llarg de les 24 hores del dia.

Si centrem l'anàlisi en el preu del PVPC, s'observen certes característiques rellevants en relació a la seva comparació amb la demanda d'energia i la cobertura eòlica:

- L'evolució del preu al llarg d'un dia típic coincideix amb la demanda d'energia: com més energia es necessita més alt és el seu cost.
- Per contra, l'època de l'any en què es requereix més energia (l'hivern) és quan aquesta és més barata. Es tracta de l'única estació en què el PVPC baixa durant algunes hores del dia dels 100 €/MWh.
- L'estiu i la tardor són les dues estacions en les quals la corba del preu evoluciona en valors més alts: els seus pics ronden els 135 €/MWh.
- Es torna a comprovar la relació indirecta entre la cobertura eòlica i el PVPC: a les hores de més alta cobertura, el preu de l'energia presenta els seus valors més baixos del dia.

Un darrer aspecte a comentar, com ja s'havia observat a les corbes d'evolució de la generació eòlica al llarg d'un dia típic, és la similitud de comportament entre la tardor i l'hivern en contraposició a la primavera i l'estiu. I és que, tant per la cobertura eòlica com pel PVPC, els pics de valors que es produeixen a les hores de la tarda tenen unes característiques diferents, que són pròpies de l'estació meteorològica. Concretament, s'observa un cert retrocés dels punts més alts pel cas dels períodes primaveral i estiuenc, respecte a les altres dues estacions.

Pel que fa a la tardor i la primavera, la cobertura eòlica té el seu pic de la tarda a les 16h i el PVPC a les 20h. D'altra banda, tant per la primavera com l'estiu, el punt màxim de cobertura de la tarda es troba a les 19h i, en canvi, el preu de l'energia assoleix el valor màxim a les 21h.

Amb aquesta anàlisi de les característiques d'un dia típic de les respectives estacions clou la presentació dels resultats bàsics de l'estudi que s'ha dut a terme. Posteriorment, s'han tornat a tractar alguns d'aquests resultats amb la finalitat de donar-hi un altre enfocament, mitjançant l'anàlisi dels cicles estacionals i la presentació a través de diagrames de caixes i bigotis.

3.3. Estudi de la variació estacional

Tal i com s'ha definit breument en el punt 3.1, l'estudi de l'estacionalitat es focalitza en els cicles regulars d'una durada igual o inferior a l'any. Uns cicles que es caracteritzen per la seva repetició regular, ja sigui diària, setmanal, mensual, trimestral, etc. Per tant, com s'ha pogut comprovar amb els resultats principals de l'estudi, les nostres sèries temporals presenten estacionalitat.

Amb la finalitat d'eliminar els efectes que provoca l'existència d'un cicle estacional en una sèrie qualsevol, es duu a terme un procediment de desestacionalització (o ajustament estacional). Tot i que hi ha diferents mètodes per calcular la variació estacional, el que s'ha decidit utilitzar és el mètode del percentatge mitjà.

Desestacionalització pel mètode del percentatge mitjà

Es tracta del procediment més ràpid i senzill per valorar el grau d'estacionalitat que presenta la sèrie temporal. I és que només amb pocs passos ja s'obté la sèrie temporal desestacionalitzada. Es calculen les mitjanes anuals, es determinen els percentatges dels valors mensuals en relació a la mitjana anual i, finalment, s'obté d'un índex estacional.

Un cop elaborat aquest índex, que es construeix per a cada mes, només cal realitzar el quocient entre el valor inicial de la sèrie i aquest índex i ja ha quedat la sèrie desestacionalitzada.

Com a mostra de l'anàlisi que s'ha seguit, a continuació es presenta un exemple del càlcul de la variació estacional pel mètode del percentatge mitjà. Es tracta de la sèrie temporal de la generació eòlica del programa horari operatiu (P48), un indicador que, com s'ha demostrat, és gairebé idèntic a la generació eòlica en temps real. S'ha construït a partir de les seves mitjanes mensuals, de manera que s'han utilitzat 12 observacions per a cada any.

Cal esmentar que, tot i que sigui un mètode que s'aplica habitualment per períodes de 5 anys o més, en el nostre cas s'aplicarà pel període bianual amb què s'ha anat treballant durant tot el projecte: abril de 2014 – març de 2016. Per tant, les dades mensuals que es mostren a la taula 9 es diferencien entre la primera dada presa (que d'abril a desembre és la del 2014 i de gener a març la del 2015) i la segona (d'abril a desembre, la del 2015 i, de gener a març, la del 2016).

En aquesta mateixa taula també es poden observar els tres primers passos del mètode del percentatge mitjà:

1. Es determina la mitjana anual.
2. Es divideix cada valor mensual entre aquesta mitjana (i es multiplica per 100), de manera que s'obté el percentatge de cada mes respecte a la mitjana anual.
3. Es calcula l'índex estacional fent la mitjana dels percentatges de cada mes.

Taula 9. Valors mensuals del programa de generació P48 eòlic (esquerra). Percentatge de cada mes respecte a la mitjana anual i índex estacional de cada mes (dreta).

	2014	2015		2014	2015	Índex estacional
Abril	5.428,17	5.535,03	Abril	96,38	97,44	96,91
Maig	5.516,71	6.533,84	Maig	97,95	115,02	106,49
Juny	4.412,58	4.229,83	Juny	78,35	74,46	76,41
Juliol	4.816,48	4.059,93	Juliol	85,52	71,47	78,50
Agost	3.823,53	4.213,80	Agost	67,89	74,18	71,03
Setembre	2.872,29	4.332,68	Setembre	51,00	76,27	63,64
Octubre	4.760,34	5.339,91	Octubre	84,52	94,00	89,26
Novembre	7.257,07	5.267,01	Novembre	128,86	92,72	110,79
Desembre	6.431,33	4.805,71	Desembre	114,19	84,60	99,40
Gener*	6.719,06	7.644,62	Gener*	119,30	134,57	126,94
Febrer*	8.988,01	8.879,75	Febrer*	159,59	156,32	157,95
Març*	6.557,67	7.324,84	Març*	116,44	128,95	122,69
MITJANA	5631,94	5680,58				

*Les dades de gener, febrer i març es corresponen a l'any 2015 i 2016 (i no 2014 i 2015)

Les dades indiquen que, per exemple, pel juliol de 2014, el volum de generació del P48 va representar el 85,52% de la mitjana anual. En canvi, el novembre del mateix any va tenir un 128,86%, és a dir, un 28,86% més respecte la mitjana.

Per obtenir els respectius índex estacionals, se sumen els valors de cada fila i es divideixen pel nombre d'anys del període total considerat (en el nostre cas, 2). Així doncs, pel cas del mes de març:

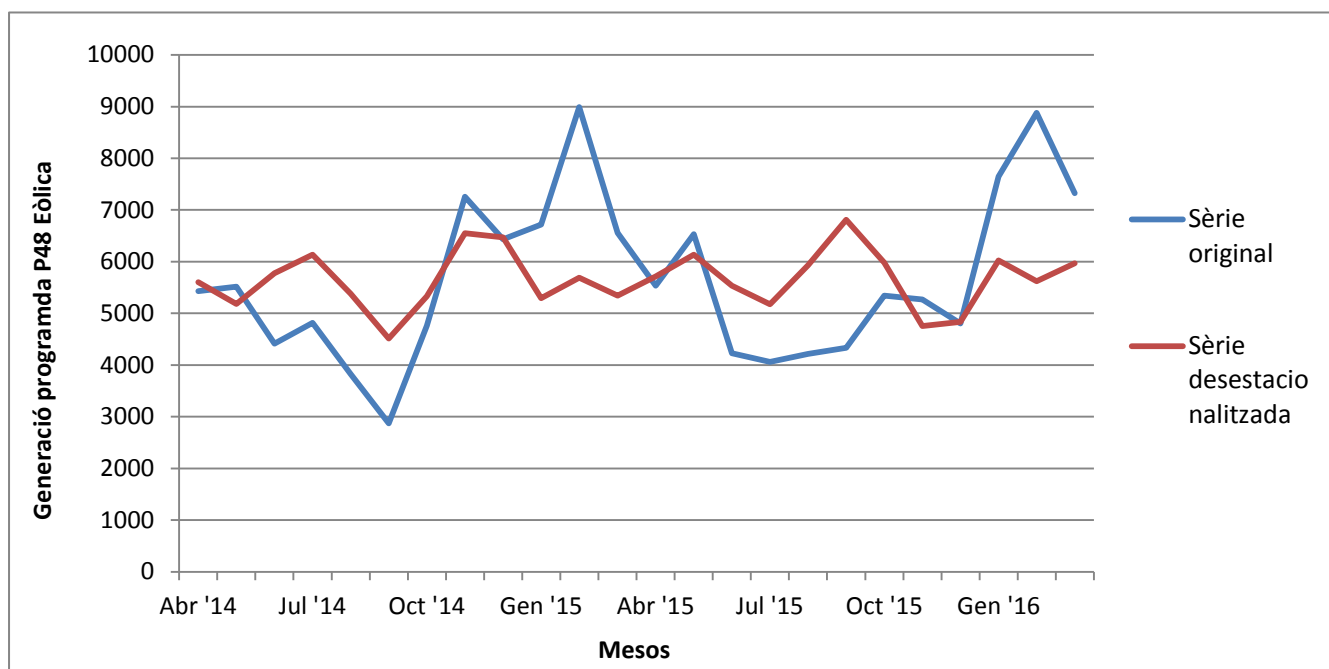
$$Index\ estacional_{MARÇ} = \frac{116,44 + 128,95}{2} = 122,69 \quad (6)$$

Aquesta xifra expressa que al mes de març l'energia programada pel P48 eòlic ha estat regularment un 22,69% més elevada que l'energia mensual mitjana de cada any. Per determinar els valors finals de la sèrie temporal ja desestacionalitzada, únicament cal dividir el valor mensual original entre el seu índex estacional i multiplicar-ho per 100. Els resultats es mostren a la taula 10. Amb tot, es pot elaborar la comparació gràfica amb la sèrie original (figura 25).

Taula 10. Valors mensuals del programa de generació P48 eòlic un cop aplicada la desestacionalització.

	2014	2015
Abril	5.601,26	5.711,52
Maig	5.180,63	6.135,79
Juny	5.775,23	5.536,05
Juliol	6.135,98	5.172,18
Agost	5.382,63	5.932,04
Setembre	4.513,64	6.808,54
Octubre	5.332,91	5.982,19
Novembre	6.550,43	4.754,15
Desembre	6.470,38	4.834,89
Gener*	5.293,15	6.022,29
Febrer*	5.690,27	5.621,74
Març*	5.344,85	5.970,14

*Les dades de gener, febrer i març es corresponen a l'any 2015 i 2016 (i no 2014 i 2015)

**Figura 25.** Sèrie temporal original i sèrie desestacionalitzada de la generació del programa P48 eòlic.

L'anàlisi de la variació estacional deixa, doncs, una sèrie temporal molt menys oscil·latòria, ja que s'ha corregit l'estacionalització de la sèrie original. D'aquesta manera, amb l'ajustament estacional, cada valor mensual es troba situat a una zona més "real" i ja no és dependent de l'època de l'any a la que es troba.

I és que, en la sèrie original, es pot observar una gran diferència deguda a les estacions meteorològiques: a l'època hivernal, alta generació eòlica i, per contra, a l'estiu, pics força baixos. La desestacionalització permet eliminar la fluctuació que es produeix deguda a aquest factor extern, que en aquest cas és el clima.

Amb xifres, si la sèrie inicial ballava entre els 3.000 MWh i els 9.000 MWh, la sèrie desestacionalitzada té una marge d'oscil·lació de poc més de 2.000 MWh (entre 4.500 MWh i 6.800 MWh). A part, com s'observa, els pics de les dues sèries no coincideixen. Mentre, originalment, s'arriba al punt màxim al mes de febrer de 2014, un cop aplicat l'ajust, aquest pic es troba al setembre de 2015, el qual, curiosament, es tracta d'un mes de baixa generació eòlica.

Aquesta contraposició és deguda al fet que com més alt és el valor d'energia programada, més gran és l'índex estacional, el qual fa que disminueixi en gran mesura el valor inicial. Per contra, si l'índex és més petit, la xifra de la sèrie temporal original es veu augmentada significativament.

L'estudi desenvolupat per l'indicador del programa del P48 Eòlic es pot extrapol·lar, en grana mesura, als indicadors del programa de generació PBF eòlic, generació eòlica en temps real i previsió de producció eòlica. Però sí que es pot seguir el mateix procediment per veure com evolucionen alguna de la resta de variables. En aquest sentit, es presenta l'anàlisi de la variació estacional de la cobertura eòlica de la demanda.

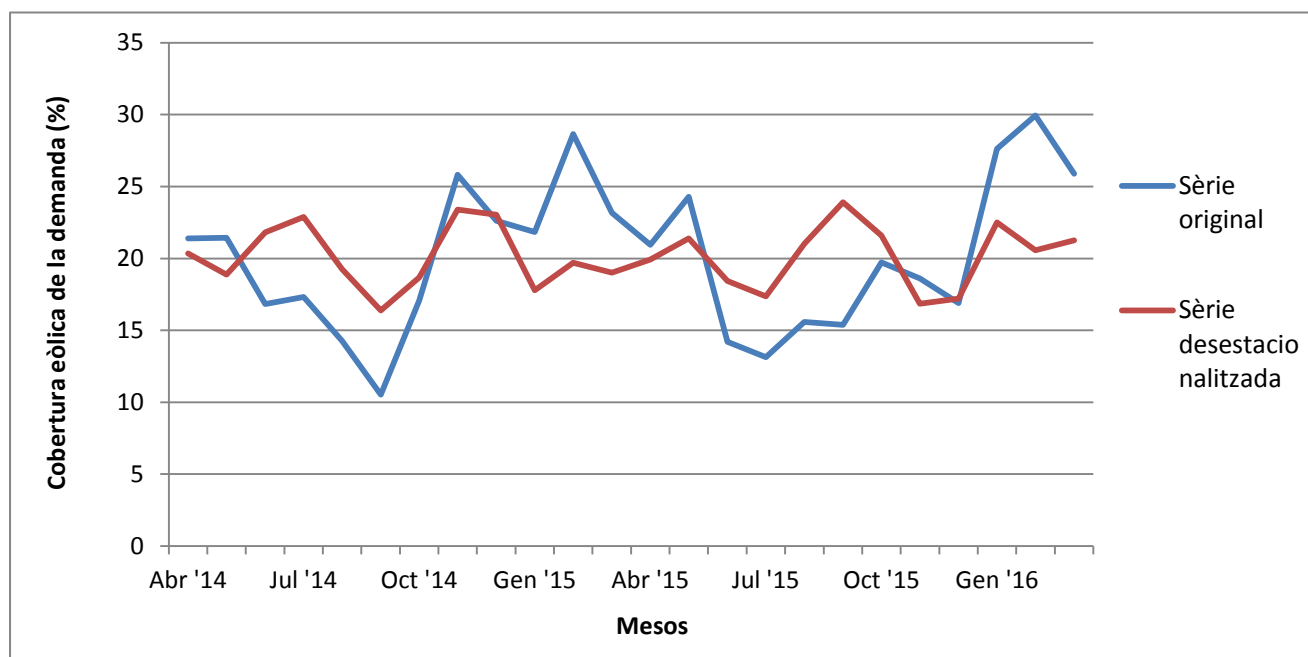


Figura 26. Sèrie temporal original i sèrie desestacionalitzada de la cobertura eòlica de la demanda.

Tal i com succeïa en la sèrie desestacionalitzada de l'energia programada del P48 eòlic, en el cas de la cobertura eòlica també s'observa com, per a forces mesos, la reducció (o augment) de valor d'un mes a l'altre és fictici, ja que realment, si es considera l'efecte estacional, aquesta modificació no és de la mateixa magnitud. La taula 11 exemplifica bé aquest aspecte per la segona meitat del període establert (abril 2015 – març de 2016).

Taula 11. Variació de la cobertura eòlica dels darrers 12 mesos per la sèrie original i per la sèrie desestacionalitzada.

	Sèrie original		Sèrie desestacionalitzada	
	Cobertura eòlica (%)	Variació percentual respecte el mes anterior (%)	Cobertura eòlica (%)	Variació percentual respecte el mes anterior (%)
Abr '15	20,96	-10,55	19,92	+4,53
Mai '15	24,29	+13,73	21,40	+6,88
Jun '15	14,21	-71,00	18,43	-16,06
Jul '15	13,14	-8,11	17,36	-6,16
Ago '15	15,58	+15,63	21,02	+17,38
Set '15	15,38	-1,30	23,91	+12,09
Oct '15	19,73	+22,07	21,59	-10,75
Nov '15	18,60	-6,08	16,85	-28,11
Des '15	16,90	-10,09	17,21	+2,08
Gen '16	27,63	+38,85	22,50	+23,52
Feb '16	29,93	+7,70	20,57	-9,36
Mar '16	25,89	-15,63	21,25	+3,19

Aquesta taula posa de manifest la diferència notable entre la cobertura eòlica de la sèrie inicial i la cobertura un cop aplicat l'ajustament estacional. Per exemple, pel cas del setembre de 2015, s'observa que es va produir una disminució de la cobertura eòlica respecte l'agost. Però, a la part dreta de la taula es comprova que si es considera l'efecte estacional, realment el setembre va tenir una millor cobertura eòlica que l'agost (augmentant un 12,09%). Aquest fet, també succeïx en els mesos d'abril i desembre de 2015 i març de 2016.

Però també es produeix la situació oposada. Tant a l'octubre de 2015 com al febrer de 2016, en realitat la cobertura hauria disminuït respecte el seu mes previ, tot i que no va ser així degut al factor estacional.

La tònica global, però, és l'esmentada atenuació dels valors extrems gràcies a la desestacionalització.

3.4. Diagrames de caixes i bigotis

Una manera diferent de visualitzar els resultats que s'han anat presentant prèviament és a través de diagrames de caixes i bigotis. L'eina utilitzada per elaborar aquestes representacions ha estat l'XLSTAT, un software estadístic per a Microsoft EXCEL.

Aquest programa està dotat de desenes de funcions que permeten millorar el tractament de dades, de manera que s'obté un significatiu estalvi de temps, a més d'un increment en la qualitat de presentació dels resultats. En aquest darrer sentit, s'han analitzat el conjunt de dades presentades en els punts previs amb la finalitat d'obtenir-ne els seus diagrames de caixes, analitzant els valors horaris tant del període sencer com de cadascun dels trimestres per separat.

Un diagrama de caixes i bigotis (o boxplot) és una representació gràfica que, basada en quartils, mostra la distribució de freqüències d'una variable a partir d'un conjunt de dades. Es realitza mitjançant un rectangle que emmarca les freqüències o probabilitats compreses entre el percentil 25 (límit inferior de la caixa) i el percentil 75 (límit superior) i que està dividit per una línia al percentil 50, el qual coincideix amb la mediana de la distribució.

Boxplot del període bianual

En primer lloc, s'ha començat per l'anàlisi del conjunt de les hores que conformen el període sencer establert. En total, s'han agrupat els 17.544 valors horaris per elaborar els diagrames de caixes dels respectius indicadors. Tot seguit, se'n mostren dos d'ells, els que fan referència a la demanda i al percentatge d'energia lliure de CO₂.

En ells, s'hi pot observar la part homogènia que explica el 50% de les dades (representada per la caixa), a més dels punts màxims, els mínims, la mediana (línia vertical de l'interior de la caixa), la mitjana (creu vermella) i els punts anòmals, que es tracta dels punts blaus situats més enllà dels bigotis.

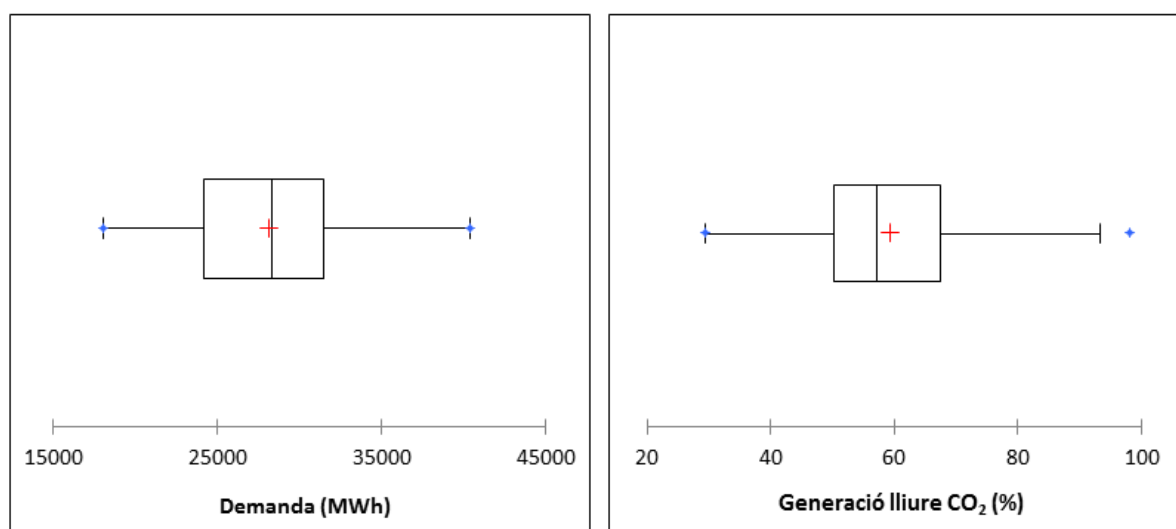


Figura 27. Boxplots de la demanda d'energia i percentatge lliure de CO₂. Valors horaris al llarg del període abril '14 – març '16.

Taula 12. Estadístics descriptius dels diagrames de caixes de la figura 27.

	Demanda (MWh)	Percentatge d'energia lliure de CO ₂ (%)
Mínim	18.035	29,45
Màxim	40.356	98,12
1r quartil	24.183	50,34
Mediana	28.321	57,22
3r quartil	31.473	67,53
Mitjana	28.073	59,49

Per l'estudi de la demanda d'energia, es comprova que no existeixen hores anòmales, ja que amb la caixa i els bigotis es poden recollir totes les dades horàries. A més, la seva mitjana coincideix gairebé amb la mediana, al voltant dels 28.000 MWh.

D'altra banda, pel cas del percentatge de generació lliure de CO₂ sí que es veu un valor extrem. Es tracta del punt en què la generació d'energia va ser del 98,12% sense emetre CO₂. Aquest valor es considera anòmal ja que, tot i posar la distància de la caixa (un total del 17,19%) una vegada i mitja cap a la dreta a partir del tercer quartil (arribant al 93,32%), encara existeix alguna hora que presenta un percentatge superior. Concretament, es tracta de 18 els punts horaris que sobrepassen aquest límit.

Entrant en detall en quins moments del període s'han produït aquestes excepcionalitats, s'observa com sempre han succeït en els primers tres mesos de l'any, durant hores diürnes (migdia i principi de la tarda) i en hores consecutives. Específicament, van ser 2 hores el 31/01/15, 9 hores al 06/01/2016 i 7 hores al 06/03/2016. Com a detall, l'hora en què es va arribar al màxim de 98,12% de generació lliure de CO₂, l'energia eòlica cobria el 60% de la demanda.

Boxplot de l'anàlisi trimestral

En el punt anterior s'han vist les característiques generals de l'indicador en qüestió al llarg de tot el període, a través d'un sol diagrama. Ara, per contra, per tal de veure l'evolució en funció de les estacions meteorològiques, se n'elaboren vuit, un per cada trimestre d'aquest període bianual.

Els indicadors amb els que s'ha treballat en aquest punt són els de la generació eòlica en temps real i el preu del mercat *spot*. Val a dir que s'ha optat per aquest últim i no pel preu del PVPC donat que presenta una major oscil·lació d'un trimestre a l'altre.

Els resultats obtinguts es presenten a la figura 28, en la qual l'eix d'abscisses està dividit per estacions meteorològiques, que fan referència als períodes trimestrals analitzats. La primavera són els mesos de gener, febrer i març; l'estiu, els de juliol, agost i setembre; la tardor, els d'octubre, novembre i desembre; i l'hivern, els de gener, febrer i març.

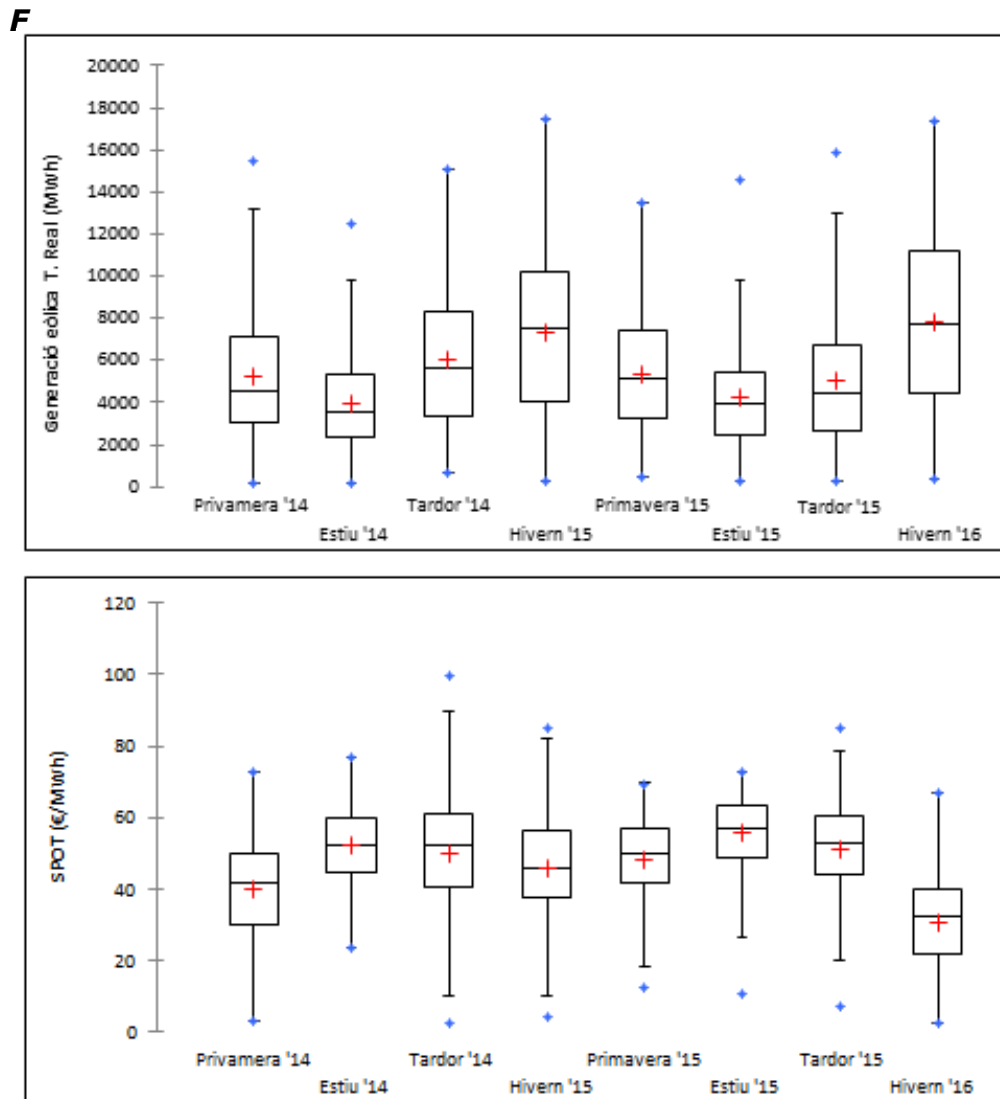


Figura 28. Boxplots de la generació eòlica i el preu del mercat spot de l'energia. Valors horaris per les respectives trimestres del període abril '14 – març '16

Aquests dos diagrames deixen entreveure clarament quina és la dispersió de les dades dels dos indicadors en funció de les estacions meteorològiques. S'observa com la generació eòlica únicament presenta valors extrems pels períodes en què la generació mitjana és inferior. És el cas dels dos estius i també de la primera primavera i la segona tardor, en els quals hi ha algunes hores d'extraordinària generació que gairebé s'equiparen als pics de l'hivern.

Focalitzant l'anàlisi pels valors extrems dels dos trimestres d'estiu, en el cas del de 2014 hi ha 2 hores (consecutives) en què la generació eòlica va superar als 12.000 MWh, cobrint prop del 40% de la demanda amb aquesta energia. Pel que fa al de 2015, en 3 moments se superen els 14.000 MWh, que serveixen per cobrir el 45% de la demanda energètica. Curiosament, aquests valors anòmals d'un any i de l'altre tenen lloc al mateix dia i aproximadament la mateixa hora: el 16 de setembre a primera hora de la tarda.

Oposadament, l'anàlisi del preu mercat *spot* mostra uns valors extrems (sobretot per la part inferior de la caixa). Són punts horaris en què l'energia s'ha cassat a un valor de pràcticament zero. Aquest fet succeeix en tots els trimestres excepte a l'estiu de 2014, el qual, a banda de presentar el diagrama més simètric, és el que té la diferència entre el preu horari mínim i màxim més petita (24 €/MWh – 77 €/MWh).

Com ja s'havia observat al llarg del punt 3.2.2 del treball, en què s'estudiava l'evolució del preu del PVPC, els tres mesos en què l'energia ha estat més barata dels darrers dos anys és aquest primer trimestre de 2016. La mitjana del preu del *pool*, com es comprova al diagrama, és de l'ordre de 30 €/MWh i, pel que fa als seus valors més baixos, aquest preu és inferior a 5 €/MWh en 52 hores al llarg d'aquests 3 mesos. Com era d'esperar, la gran majoria d'aquestes hores en que l'energia té un cost tan reduït, se situen en moments de matinada.

Al llarg d'aquest tercer capítol del projecte s'han presentat els resultats obtinguts de l'evolució històrica dels diferents indicadors, enfocats des de diferents perspectives. És a dir, s'han utilitzat tècniques de l'àmbit descriptiu. El següent pas és el d'intentar projectar aquests valors obtinguts per un període relativament curt, amb la finalitat d'extreure una aproximació dels valors futurs com més acurada possible.

CAPÍTOL 4:

ANÀLISI PREDICTIVA

En el quart capítol del projecte es desenvolupa un estudi predictiu d'algun dels paràmetres que s'han tractat en el capítol anterior. L'objectiu és doncs el de determinar, en la mesura que sigui possible, els nous valors que continuarien les respectives corbes evolutives, les quals finalitzaven a 31 de març de 2016. El procediment que se seguirà per tal de realitzar aquests pronòstics és el suavitzat exponencial.

El mètode de la suavització exponencial elimina la fluctuació aleatòria, de manera que s'obtenen patrons de comportament de la sèrie temporal que fan possible la predicció de futurs valors de la mateixa sèrie. Les tres tècniques de suavitzat exponencial més destacades són les següents:

- Suavitzat exponencial simple.
- Suavitzat exponencial de Holt.
- Suavitzat exponencial de Winters.

Els dos últims mètodes s'apliquen a sèries que presenten una tendència lineal. Com que, pel nostre cas, s'ha observat que la tendència era inexistent, es treballarà amb el suavitzat exponencial simple. Aquest mètode és el més utilitzat degut a la seva simplicitat. Consisteix en la estimació, per a cada període, d'un valor que és resultat de la suma ponderada de totes les observacions anteriors, donant més importància a les observacions més recents que a les més antigues.

Aquest suavitzat exponencial simple s'aplicarà pel mes que seguiria la nostre sèrie temporal (abril de 2016) i també pel global d'aquest mateix any 2016.

4.1. Pronòstic Abril 2016

Els indicadors que és pretenen pronosticar amb el suavitzat exponencial simple per l'abril de 2016 són els següents:

- Generació eòlica en temps real (MWh).
- Demanda d'energia (MWh).
- Cobertura eòlica de la demanda (%).

4.1.1. Generació d'energia eòlica

La sèrie temporal que s'utilitzarà d'exemple del suavitzat exponencial simple és la generació eòlica en temps real, de la que tot seguit es mostren els seus valors mitjos mensuals.

Taula 13. Valors mitjos mensuals de la generació d'energia eòlica en temps real.

	Generació eòlica (MWh)		Generació eòlica (MWh)		Generació eòlica (MWh)		Generació eòlica (MWh)
Abr '14	5.573,81	Oct '14	4.534,10	Abr '15	5.482,87	Oct '15	5.243,18
Mai '14	5.593,95	Nov '14	7.116,14	Mai '15	6.457,56	Nov '15	5.147,89
Jun '14	4.562,92	Des '14	6.487,28	Jun '15	4.010,97	Des '15	4.740,74
Jul '14	4.914,43	Gen '15	6.663,36	Jul '15	4.143,91	Gen '16	7.594,10
Ago '14	3.883,00	Feb '15	8.975,53	Ago '15	4.362,93	Feb '16	8.742,31
Set '14	2.972,07	Mar '15	6.597,10	Set '15	4.171,16	Mar '16	7.316,81

Per dur a terme la predicció, el mètode del suavitzat exponencial simple únicament necessita dels valors mitjos mensuals (taula 13), una constant d'aïllament i l'inici de la sèrie. Amb aquests paràmetres, es construirà una nova sèrie (sèrie aïllada) dels 24 mesos i, a part, també es podrà estimar el valor del mes 25, que correspon a l'abril de 2016.

Pel primer valor de pronòstic (S_0), s'assignarà la primera dada de la sèrie (X_1), ja que es tracta d'una sèrie temporal amb altes oscil·lacions. A més, pel que fa a la constant d'aïllament (α) es prendrà un valor que és adient per la gran majoria de casos. Així doncs:

- Constant d'aïllament: $\alpha = 0,2$.
- Inici de la sèrie: $S_0 = X_1 = 5.573,81$.

A partir d'aquest valor inicial es comença a construir la sèrie suavitzada segons la fórmula del suavitzat exponencial simple:

$$S_n = S_{n-1} + \alpha \cdot (X_{n-1} - S_{n-1}) \quad (7)$$

On:

- S_n = Nou pronòstic.
- S_{n-1} = Pronòstic període anterior.
- X_{n-1} = Valor real període anterior.
- α = Constant d'aïllament.

Així doncs, per la sèrie que ens ocupa:

$$S_0 = X_1 = 5.573,81$$

$$S_1 = 5.573,81 + 0,2 \cdot (5.573,81 - 5.573,81) = 5.573,81$$

$$S_2 = 5.573,81 + 0,2 \cdot (5.593,95 - 5.573,81) = 5.597,98$$

⋮

$$S_{23} = 5.532,82 + 0,2 \cdot (8.742,31 - 5.532,82) = 6.174,72$$

Aquest darrera xifra (S_{23}) correspon al valor de la sèrie suavitzada per a l'últim mes del període, març de 2016. Però l'objectiu era el de predir el següent valor (abril de 2016). Per tant:

$$S_{24} = 6.174,72 + 0,2 \cdot (7.316,81 - 6.174,72) = \mathbf{6.403,13}$$

És a dir, s'ha obtingut que per l'abril del 2016, la generació eòlica mitjana hauria d'haver estat de 6.403,13 MWh. Comparant-ho amb el valor que es va produir realment, es pot determinar el percentatge d'error que ha tingut el mètode:

Taula 14. Error relatiu obtingut entre el valor real i el predit per la generació eòlica mitjana d'abril de 2016.

	Generació eòlica Abril 2016 (MWh)
Valor real	6.206,59
Valor predit	6.403,13
ERROR RELATIU (%)	3,17

La comparació entre els dos valors posa de manifest que la predicció realitzada és certament bona. Un marge d'error del 3% significa que amb el mètode de la suavització exponencial simple es pot arribar a assolir un nivell d'aproximació molt acurat. Tot i així, aquest percentatge depèn força del mes analitzat, com es comprovarà posteriorment.

D'altra banda, focalitzant l'anàlisi en el valor real de generació eòlica obtingut per l'abril de 2016, es reafirmen les bones expectatives de l'eòlica en aquests primers mesos de l'any. Com s'havia vist anteriorment, la cobertura eòlica s'havia incrementat, de mitjana, un 11,56% el primer trimestre de 2016 respecte els tres primers mesos de 2015. Ara, doncs, també es comprova que la generació eòlica ha augmentat un 13,20% a l'abril de 2016 respecte el mateix mes de l'any anterior, quan s'havien generat 5.482,87 MWh eòlics de mitjana.

Tornant a l'estudi predictiu, però, cal remarcar que no sempre el percentatge d'error entre el valor pronosticat i el valor veritable ha estat tan reduït. Sinó que com s'observa a la figura 29, en molts mesos del període, la diferència entre la sèrie temporal real i la sèrie aïllada amb el suavitzat és força més important.

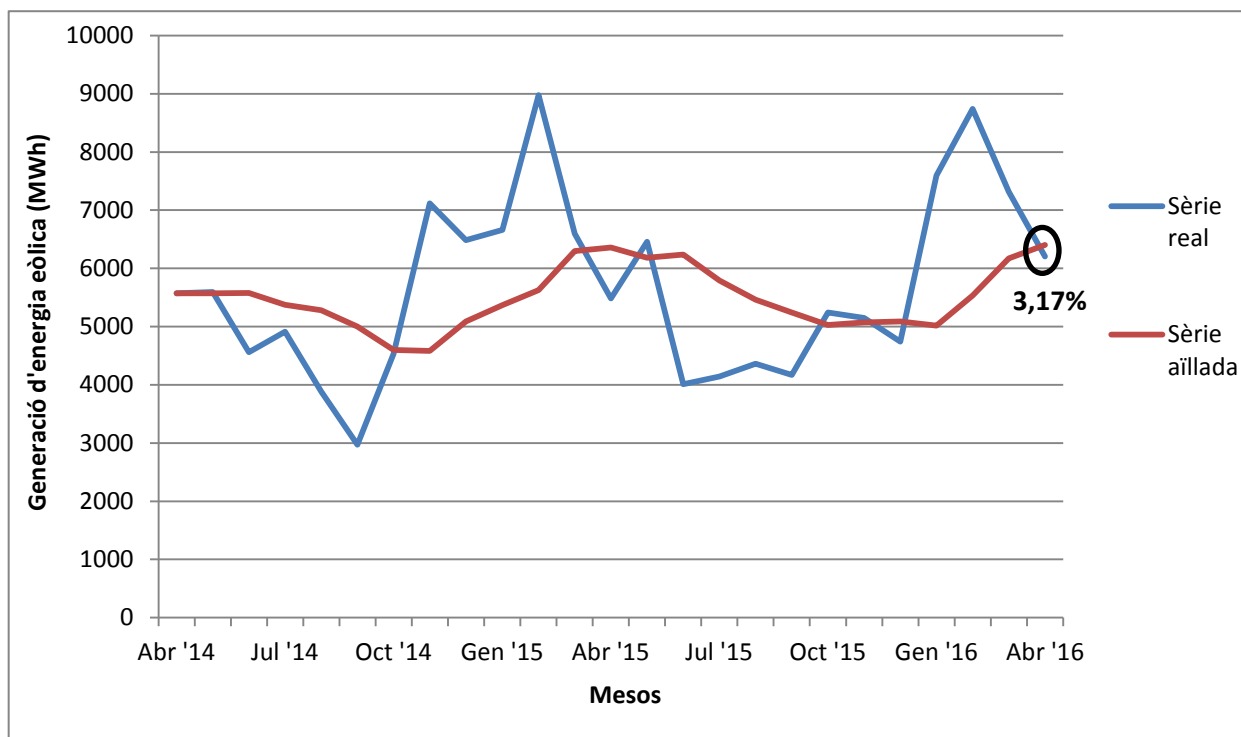


Figura 29. Evolució de la generació eòlica real i la pronosticada des d'abril de 2014 fins abril de 2016

De manera similar al que es produïa en la desestacionalització de la sèrie, també es comprova en aquest cas una reducció de l'oscil·lació. Tal com s'anomena el mètode, es produeix una suavització dels valors més extrems. És per aquest motiu que en les èpoques més puntes o valls de generació (molt elevada, a l'hivern o molt baixa, a l'estiu), hi ha una gran diferència entre la realitat i l'anàlisi predictiu. De fet, en determinats mesos d'aquests moments de l'any, l'error relatiu entre les dues magnituds s'enfila fins a més del 30%.

Per contra, tant per la tardor com la primavera, les variacions no són tan significatives, ja que les xifres de generació en aquests moments de l'any es mantenen al voltant dels paràmetres mitjans anuals. I com que la sèrie aïllada oscil·la només entre 2.000 MWh (4.400 MWh – 6.400 MWh), és lògic que la diferència entre els dos punts de les sèries sigui més petita.

Curiosament, el valor pronosticat pel mes d'abril de 2016 es tracta del punt més alt de la sèrie aïllada. Aquest fet és degut a que el mètode del suavitzat exponencial dona una importància més gran a les observacions més recents, de manera que si en els mesos anteriors s'ha produït una alta generació, el valor predit serà més gran. Així doncs, com que es provenia dels mesos de gener, febrer i març de 2016 en què els nivells eòlics van ser molt destacats, la conseqüència ha estat que al mes d'abril la predicció també assolís un registre rècord.

4.1.2. Demanda d'energia i la seva cobertura amb eòlica

De la mateixa forma que en el primer apartat, també s'ha procedit a la predicció (i conseqüent comparació amb els valors reals) dels registres de demanda i cobertura eòlica a abril de 2016.

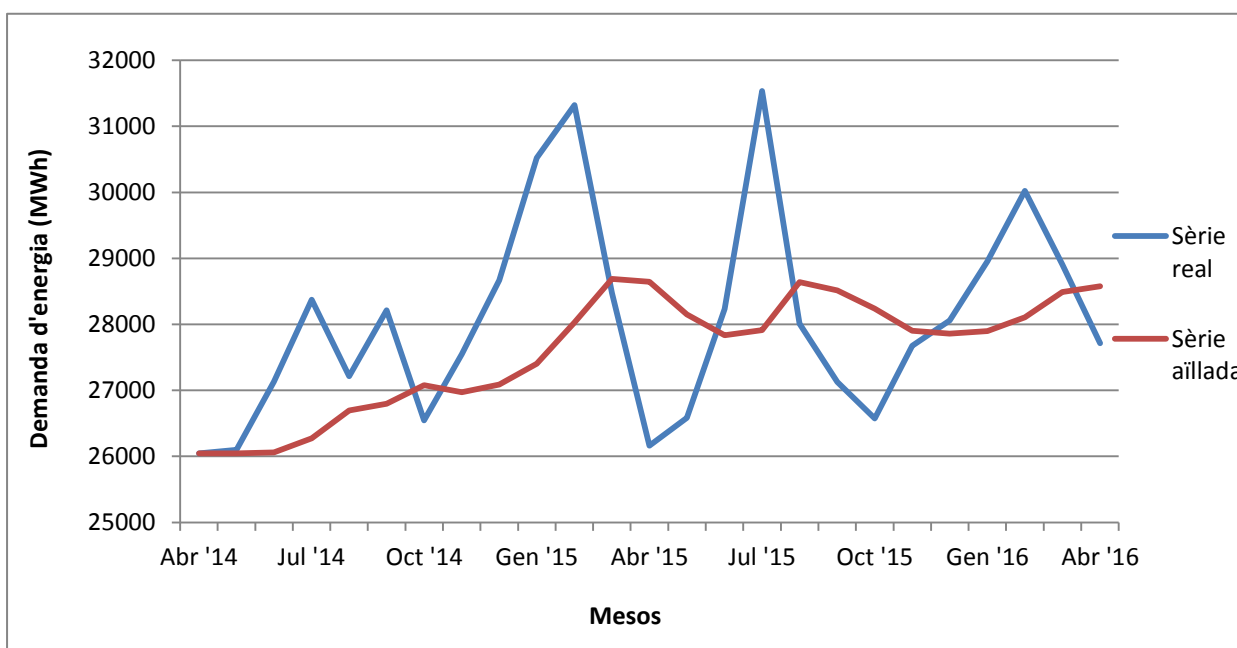


Figura 30. Evolució de la demanda real i la pronosticada des d'abril de 2014 fins abril de 2016.

Taula 15. Error relatiu obtingut entre el valor real i el predit per la demanda mitjana d'abril de 2016.

	Demanda d'energia Abril 2016 (MWh)
Valor real	27.714,71
Valor predit	28.574,90
ERROR RELATIU (%)	3,10

La diferència percentual, com s'observa, és força similar a l'estudi anterior. I és que les característiques de la demanda són força similars a les de generació eòlica. Traient el juliol de 2015, que va ser una excepcionalitat amb demanda d'energia, els pics es tornen a produir en èpoques hivernals. Aquest fet, com s'ha esmentat, provoca que als mesos immediatament posteriors a aquests, la predicció amb el suavitzat sigui especialment elevada. Amb tot plegat, la predicció a l'abril de 2016 torna a superar el seu valor real; en aquest cas, amb un marge d'error del 3,1%.

Pel que fa a la demanda real que es va requerir, de mitjana, a l'abril de 2016, es comprova que és força més gran que als dos anys anterior. Així doncs, la dada obtinguda anteriorment de l'increment d'energia eòlica respecte el 2015, queda ara força contextualitzada dintre d'aquest augment en la demanda d'energia. Per tant, l'indicador que marcarà si realment s'ha produït un increment en la importància de l'eòlica respecte abril de 2015 serà la cobertura eòlica de la demanda.

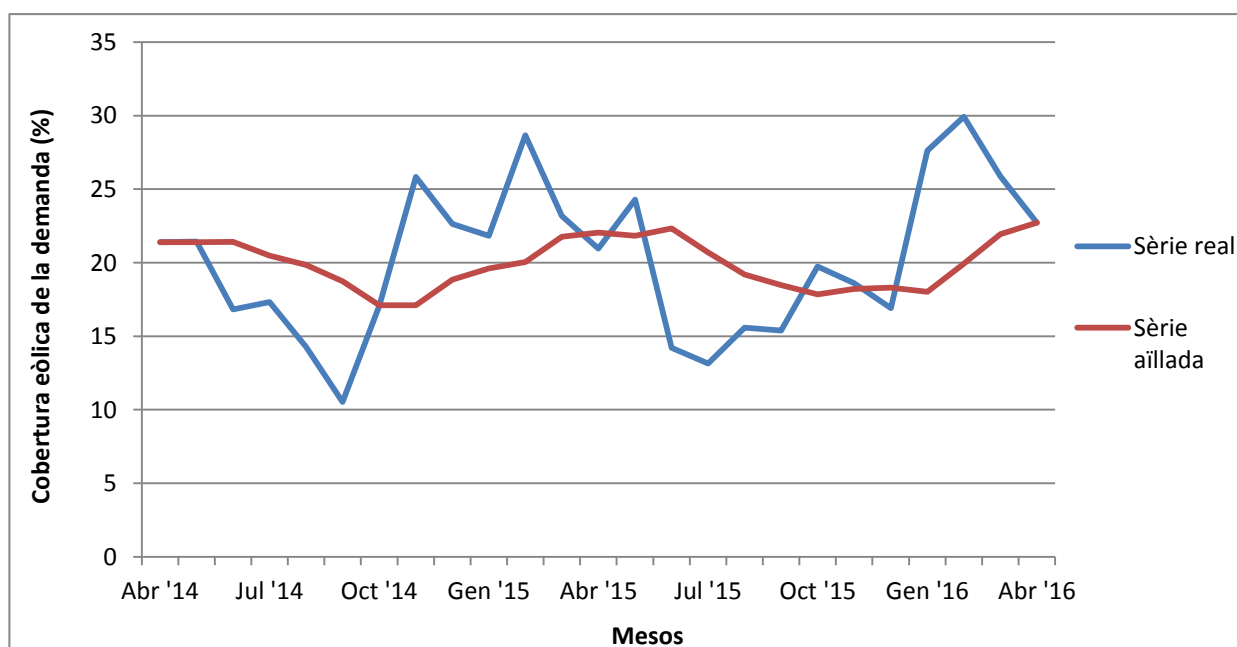


Figura 31. Evolució de la cobertura real i la pronosticada des d'abril de 2014 fins abril de 2016.

Taula 16. Error relatiu obtingut entre el valor real i el predit per la cobertura eòlica mitjana d'abril de 2016.

	Cobertura eòlica Abril 2016 (%)
Valor real	22,7206
Valor predit	22,7295
ERROR RELATIU (%)	0,039

Per aquesta darrera anàlisi, de manera totalment coincident, s'ha pronosticat un valor gairebé idèntic a l'obtingut veritablement. Un error relatiu del 0,039% és el que hi ha entre la cobertura eòlica de la demanda que es va produir realment a l'abril de 2016 i la xifra vaticinada amb el suavitzat exponencial simple.

Però, òbviament, en la resta de mesos, la diferència entre les dues sèries no és tan petita. Tal i com ja s'ha vist en els altres dos estudis, el suavitzat exponencial varia entre valors bastant estables de manera que es produeix molta diferència entre les sèries als mesos d'estiu i hivern. Per aquest cas, la cobertura eòlica real ha oscil·lat entre el 10 i el 30%, mentre que la pronosticada ho ha fet només entre un mínim del 17% i un màxim del 22,73%, el qual s'ha tornat a obtenir per el darrer mes.

Per acabar, cal remarcar que aquesta cobertura eòlica de gairebé el 23% d'abril de 2016 manté la bona dinàmica d'aquest inici d'any en comparació al 2015. Concretament, representa un increment de la cobertura del 8,4% respecte el mateix mes d'abril de l'any anterior, moment en què no es va arribar al 21% de cobertura eòlica de la demanda.

4.2. Pronòstic any 2016

Finalment, també s'ha realitzat l'estudi predictiu per la globalitat del present any. A través dels valors dels darrers 5 anys (que Red Eléctrica Española presenta en els seus informes anuals) i utilitzant el mateix mètode del suavitzat exponencial simple, s'ha pogut vaticinar el volum de demanda i de generació eòlica per l'any 2016 sencer.

El fet d'agafar els valors des de 2011 fins 2015 es deu exclusivament al propòsit de considerar èpoques amb característiques similars pel que fa al consum dels ciutadans, a la quantitat d'eòlica instal·lada, polítiques governamentals, etc. Ja que si s'allargava l'anàlisi fins 10 o més anys enllà, les particularitats de cada any (sobretot pel que fa a l'eòlica) eren molt diferents.

Els paràmetres considerats pel mètode del suavitzat exponencial simple disten una mica dels del punt anterior, en els quals l'inici de la sèrie aïlla era igual al primer valor de la sèrie real. En aquest cas, com que l'oscil·lació de la sèrie no és tan accentuada, es pren la mitjana de valors de la sèrie real com a inici de la sèrie aïllada. Pel que fa al coeficient d'aïllament, és manté per les dues sèries en el 0,2. Per tant:

- Constant d'aïllament: $\alpha = 0,2$
- Inici de la sèrie de la generació eòlica: $S_{0. \text{ Gen Eòl. }} = \bar{X}_{\text{Gen.Eòl.}} = 48.582 \text{ GWh}$
- Inici de la sèrie de la demanda d'energia: $S_{0. \text{ Demanda }} = \bar{X}_{\text{Demanda}} = 248.962 \text{ GWh}$

En aquest estudi, a diferència del que ha anat succeint en les diferents anàlisis presentades, s'han considerat els volums d'energia globals, els que procedeixen de sumar els valors de cada hora de l'any. Per aquest motiu, els resultats s'expressen en GWh.

Taula 17. Pronòstic de generació eòlica i demanda d'energia per l'any 2016, en comparació amb els seus valors reals dels 5 anys anteriors.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Generació eòlica (GWh)	42.105	48.130	54.334	50.622	47.721	48.896
Demanda d'energia (GWh)	254.786	252.191	246.166	243.486	248.181	248.379

Les sèries de generació eòlica i demanda d'energia han evolucionat de manera oposada des de 2011. Mentre la demanda ha anat decreixent fins el 2015 (moment en què torna a remuntar), la generació eòlica ha seguit una evolució contrària: en augment fins el 2013 i en disminució des de llavors.

Fet que sembla força paradoxal, ja que, en teoria, la generació eòlica hauria de seguir *in crescendo* en els moments actuals que estem vivint. Però, com s'ha anat comentant, les polítiques per afavorir aquestes fonts netes han brillat per la seva absència en els últims anys.

La previsió que s'extreu a través del suavitzat va força en la línia de la mitjana que tenen, els dos indicadors, al llarg dels cinc anys. Es preveu que la generació eòlica augmenti respecte el 2015, fet que sembla bastant evident vistos els registres dels quatre primers mesos de l'any. D'altra banda, la demanda d'energia gairebé no es veurà pràcticament modificada respecte el darrer any, la qual cosa també va en consonància amb les xifres obtingudes en el principi de 2016 respecte l'any 2015.

CAPÍTOL 5:

PRESSUPOST

L'avaluació econòmica del projecte comprèn tant les despeses relacionades amb la dedicació a l'elaboració del treball (costos d'enginyeria) com també el material emprat per dur-lo a terme (costos de software). En aquest darrer sentit, a part de l'ordinador i la connexió a Internet, s'han utilitzat dos eines de pagament: Microsoft Office 2016 Student i XLSTAT software. Pel que fa al programa XLSTAT, degut al fet que està disponible per a qualsevol usuari una versió gratuïta de prova (que és la que s'ha fet servir), el seu cost no ha estat considerat en el pressupost final del projecte.

Així doncs, els costos de software i d'enginyeria comprenen els següents aspectes:

Taula 18. *Costos de software.*

	Preu (€)	Cost 6 mesos (€)	Cost total (€)
Microsoft Office 2016 Student	150 €/any	75	75
HP Pavilion Notebook 15 PC	700		700
Internet	42 €/mes	252	252
Costos de software			1.027

Taula 19. *Costos d'enginyeria.*

	Salari (€/h)	Dedicació (h)	Cost total (€)
Tutor intern	40	25	1000
Enginyer junior	18	600	10.800
Costos d'enginyeria			11.800

Sumant els dos tipus de despeses, s'obté el pressupost definitiu del treball de fi de grau que es mostra a la taula 20.

Tabla 20. *Pressupost total del projecte.*

	Cost total (€)
Costos de software	1.027
Costos d'enginyeria	11.800
SUBTOTAL	12.827
IVA (21%)	2.693,67
TOTAL	15.520,67

Considerant les dues retribucions esmentades, a més del valor de l'IVA a Espanya, la xifra final del cost del projecte fi de grau ascendeix fins als QUINZE MIL CINC-CENTS VINT EUROS AMB SEIXANTA-SET CÈNTIMS.

CAPÍTOL 6:

CONCLUSIONS

En aquest projecte s'ha estudiat de manera extensa quina ha estat l'evolució de l'ús de l'energia eòlica a Espanya els últims dos anys. Per tenir en compte els factors més importants en els que intervé aquesta font d'energia, s'han relacionat els índex de generació eòlica amb l'aportació a la cobertura de la demanda, en la determinació del preu de l'energia i en la reducció de les emissions contaminants.

Així doncs, s'ha vist quina era la trajectòria de diferents indicadors (demanda d'energia, generació eòlica, cobertura eòlica, preu del PVPC...) des d'abril de 2014 fins a març de 2016. Es tracta de 24 mesos, de manera que s'han analitzat dos primaveres, dos estius, dos tardors i dos hiverns, fet que ha permès que es puguin comparar les dades en funció de l'època de l'any, la qual s'ha constatat que és fonamental per entendre cada resultat.

En aquesta línia, s'ha observat la gran diferència de generació eòlica entre l'hivern i l'estiu. Mentre en els mesos més freds la cobertura eòlica de la demanda sempre supera, de mitja mensual, el 20%; per el període estival, en canvi, no s'arriba a aquest percentatge en cap mes. Especialment significatiu ha estat el pes de l'eòlica en els tres primers mesos de 2016, en els quals, gràcies a les condicions climatològiques favorables, s'ha assolit el 27,8% de cobertura eòlica de mitjana trimestral.

Aquest gran increment de l'eòlica (més de 4 punts percentuals respecte el primer trimestre de l'any 2015) ha suposat que en aquests mesos de gener, febrer i març de 2016 el preu de l'energia hagi caigut fins a xifres rècord. I és que la tarifa regulada del PVPC ha registrat els seus mínims històrics en aquest trimestre, amb una reducció de més del 20% respecte l'any anterior. L'estalvi per un consumidor mitjà (300 kWh/mes) ha estat de més de 23 euros al final d'aquest trimestre en comparació al 2015.

La forta relació indirecta entre la generació eòlica i el preu de l'energia al mercat de l'electricitat és deguda a la prioritat d'accés que ostenten totes les energies renovables (i també la nuclear) per entrar a aquest mercat. En ell, aquestes

tecnologies sempre realitzen les seves ofertes de venda a zero, de manera que desplacen la corba d'oferta significativament cap a la dreta. Amb tot, com més renovable entra, més es desplaça la corba i més baix s'acaba cassant el preu final de l'energia a Espanya.

Però no només s'han demostrat els beneficis econòmics que comporta l'augment de l'energia eòlica, sinó que també s'ha comprovat la seva rellevància en la reducció de la contaminació atmosfèrica. La representació del percentatge de generació lliure de CO₂ respecte la cobertura eòlica ha deixat clara la gran relació directe entre els dos indicadors ($R^2=0,7061$). En els dies que la cobertura eòlica de la demanda ha presentat valors superiors al 30%, més del 60% del total d'energia generada a Espanya estava exempta d'emissions de CO₂.

Alhora, també s'ha verificat l'energia eòlica com a capdavantera dintre de totes les fonts renovables. En el primer trimestre de 2016, el 40% de l'energia generada sense emetre CO₂ a Espanya va ser generada gràcies al vent.

Posteriorment, s'ha enfocat l'estudi dels mateixos indicadors a través de la seva evolució diària, obtenint les característiques d'un dia típic de cada estació meteorològica. Amb tot, s'ha pogut veure com la generació eòlica manté uns registres força constants al llarg de les 24 hores, fet que comporta que la cobertura eòlica sigui molt gran en les hores valls de demanda (fins les 7 del matí) i en canvi certament més petita quan augmenta la demanda peninsular.

D'altra banda, s'ha constatat que el cost del PVPC va en consonància, al llarg del dia, amb els índex de demanda (tenint els pics al migdia i el vespre); però, en canvi, pel que fa a les estacions meteorològiques, no se segueix la mateixa tònica: l'època en què la demanda es mou en valors més elevats, a l'hivern, és quan el cost de l'energia és més baix.

Finalment, per complementar l'anàlisi, s'han aplicat dos mètodes: el primer, per estudiar els cicles estacionals de les sèries i, el segon, per establir una predicció dels valors futurs que continuarien aquestes sèries temporals.

En el primer cas, el que s'ha fet és un procés de desestacionalització a través del mètode del percentatge mitjà. Això ha permès descobrir quina era la posició real de cada dada sense la influència estacional que, en el nostre cas, anava lligada amb l'estació meteorològica. En aquest sentit, s'ha vist com l'augment o decrement dels valors mensuals era, en molts casos, fictici, ja que únicament s'havia produït per estar en un o altre moment de l'any.

Pel que fa a l'estudi predictiu, s'ha comprovat com el mètode utilitzat per fer aquests pronòstics, el suavitzat exponencial simple, presenta una acurada aproximació respecte la magnitud real depenent de l'època de l'any que s'analitza. I és que s'ha vist com per les estacions en què els indicadors presentaven uns valors més extrems, els estius i els hiverns, el nivell de precisió del mètode era força baix.

Casualment, les característiques del mes que seguia la sèrie i que s'ha estudiat (abril de 2016), han afavorit que la diferència entre el valor real i el vaticinat sigui força reduïda, de manera que els errors relatius obtinguts en els tres casos analitzats han estat minúsculs. La predicció de la generació eòlica s'ha allunyat un 3,17% del valor real, la demanda ho ha fet un 3,10% i la cobertura eòlica únicament un 0,04%.

Extrapolant aquest estudi de l'abril de 2016 pel conjunt de l'any 2016, s'han predit uns registres de generació eòlica superiors als totals de 2015 (anant amb consonància amb les bones dades d'aquests primers mesos) i un valor de demanda d'energia lleugerament més elevada que la de l'any passat.

Amb tot, després d'analitzar profundament la situació que viu l'energia eòlica a l'Estat espanyol, es pot considerar que, tot i els significatius avantatges econòmics i mediambientals que comporta, la seva implantació i desenvolupament encara està en un procés d'incertesa.

Es tracta del recurs renovable més madur a pesar que l'any 2015 fos el primer sense ni un MW eòlic instal·lat. Per tant, tot i les traves que està tenint, està demostrat que és un sector que rendeix i que presenta un nivell d'explotació molt més gran que el que se li està donant en l'actualitat. És una tecnologia que ha d'esdevenir primordial en la transició del model energètic, tal i com ho ha estat en el primer trimestre de 2016. Aquest trimestre ha estat l'únic en que s'ha observat un increment significatiu, ja que per la resta, la seva explotació des d'abril de 2014 no ha experimentat importants augments sostinguts.

És a dir que les direccions són evidents i els resultats que pot oferir aquest recurs renovable també estant clars. La decisió, doncs, recau en la voluntat de tots plegats.

CAPÍTOL 7:

BIBLIOGRAFIA

7.1. Referències bibliogràfiques

- "Bienvenido | ESIOS Electricidad · Datos · Transparencia". 2016. *Esios.Ree.Es*. <https://www.esios.ree.es/es>. [Accessed 3 Mar. 2016]
- "Energía Eólica - Fuente De Energía Renovable". 2016. *Acciona.Com*. <http://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>. [Accessed 22 Mar. 2016]
- Español, Operador del Mercado Eléctrico. "Reglas de funcionamiento del mercado eléctrico de producción." (2012).
- "Global Statistics | GWEC". 2016. *Gwec.Net*. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR_corrected.pdf [Accessed 23 Mar. 2016]
- "IEA Wind Annual Reports". 2016. *ieawind.Org*. http://www.ieawind.org/annual_reports.html. [Accessed 20 Mar. 2016]
- "Manual De La Energía". 2016. *Energiaysociedad.Es*. <http://www.energiaysociedad.es/tipo/manual-de-la-energia>. [Accessed 4 Apr. 2016]
- "Publicaciones | Red Eléctrica De España". 2016. *Ree.Es*. <http://www.ree.es/es/publicaciones>. [Accessed 3 May 2016]
- Quintanilla, Saúl. 2016. "Asociación Empresarial Eólica - Spanish Wind Energy Association - Energía Eólica". *Aeeolica.Org*. <http://www.aeeolica.org/>. [Accessed 17 Mar. 2016]
- "Wind in Power. 2015 European Statistics | EWEA". 2016. *ewea.org*. <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf> [Accessed 24 Mar. 2016]

7.2. Bibliografia de Consulta

- Alamillos, Angel Muñoz, Juan Antonio Vicente Vírseda, and Azahara Muñoz Martínez. Estadística para administración y dirección de empresas. Ediciones Académicas, 2010.
- Ammonit.com. (2016). Energía eólica: relevancia, historia y evaluación de la energía eólica. [online] <http://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica> [Accessed 3 Apr. 2016].

- Anderson, David R., Dennis J. Sweeney, and Thomas A. Williams. Estadística para administración y economía. No. 658.0021 A546e. International Thomson, 2001.
- "Bájate La Potencia". 2016. Bajatelapotencia.Org. <http://www.bajatelapotencia.org/>. [Accessed 1 Apr. 2016]
- Bueno, Antonio Gabriel Gómez. "Sin información no hay revolución: El impacto de la aprobación del Real Decreto 216/2014 (PVPC) sobre la actividad de comercialización." Cuadernos de energía 42 (2014): 79-85.
- Chatfield, Chris. The analysis of time series: an introduction. CRC press, 2013.
- "Detail| EWEA". 2016. Ewea.Org. <http://www.ewea.org/news/detail/2016/01/20/spains-500mw-wind-auction-inadequate-government-risks-missing-2020-renewables-target/>. [Accessed 25 Mar. 2016]
- "Energía Eólica". 2016. Proyectopv.Org. <http://www.proyectopv.org/2-verdad/energiaeol.htm>. [Accessed 25 Mar. 2016]
- Estany, Eduard Furró. Catalunya, aproximació a un model energètic sostenible. Octaedro Editorial, 2016.
- European Wind Energy Association. The economics of wind energy. EWEA, 2009.
- "Història De L'eòlica - EOLICCAT". 2016. EOLICCAT. <http://eoliccat.net/situacio-eolica/historia-de-leolica/>.
- Josa, Alberto Carbajo. "Los mercados eléctricos y los servicios de ajuste del sistema." Economía industrial 364 (2007): 55-62.
- Morales, Andrés, and Araceli Rendón Trejo. "Análisis de variación estacional en series temporales." [Accessed 28 Apr. 2016]
- Pérez López, César. "Métodos estadísticos avanzados con SPSS."Thompson. Madrid (2005).